

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА имени К.А.ТИМИРЯЗЕВА»

На правах рукописи

АНДРЕЕВ СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ

**НАУЧНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЭНЕРГО-РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССАХ АПК**

Специальность: 4.3.2 – Электротехнологии, электрооборудование и
энергоснабжение агропромышленного комплекса

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук, профессор
Загинайлов Владимир Ильич

Москва – 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
Глава 1. Состояние энерго-ресурсосбережения в АПК	18
1.1 Постановка вопроса по реализации проблемы энерго-ресурсосбережения в АПК в современных научных исследованиях.....	18
1.2 Актуальность разработки электротехнологических способов и технических средств энерго-ресурсосбережения в системах тепло-водоснабжения объектов АПК.....	20
1.3 Актуальность разработки технических средств для энерго-ресурсосбережения при эксплуатации СВЧ-оборудования сельскохозяйственного назначения.....	23
1.4 Актуальность ресурсо-энергосбережения при использовании силовых ветродвигателей.....	27
Глава 2. Обоснование научно-методологических основ энерго-ресурсосбережения в технологических процессах АПК	33
Выводы по главе 2.....	52
Глава 3. Электротехнологические способы и технические средства энерго-ресурсосбережения в системах тепло-водообеспечения объектов АПК	54
3.1 Совершенствование методики расчета энергосберегающих низкотемпературных децентрализованных систем отопления	54
3.1.1 Постановка задачи оптимизации конструкций децентрализованных отопительных систем	54
3.1.2 Определения функциональной взаимосвязи температуры теплоносителя и рабочей поверхности теплообменных аппаратов.....	59
3.1.3 Алгоритм численного метода расчета энерго-ресурсосберегающих гидравлических отопительных систем.....	60
3.2 Обоснование осциллирующего режима подключения грунтовых теплообменников.....	63

3.3 Электризационное осаждение пыли в помещениях с обогреваемыми полами.....	69
3.3.1 Основные закономерности распределения и движения пыли в помещении с обогреваемыми полами.....	69
3.3.2 Исследование влияния неоднородного электрического поля на частицы пыли	73
3.3.3 Технические средства для электризационного осаждения пыли на поверхности обогреваемых полов.....	77
3.4 Электротехнологические способы энерго-ресурсосбережения в газовых водогрейных котлах и технические средства для их осуществления.....	83
3.4.1 Анализ процесса горения газа и влияния условий его протекания на технико-экономические и экологические показатели.....	83
3.4.2 Исследование самораспада озона при его транспортировке в топочную камеру	88
3.4.3 Обоснование использования электронно-ионной технологии для подачи озона в топочную камеру	91
3.4.4 Управление концентрацией озono-воздушной смеси в камере сгорания водогрейных котлов	94
3.4.5 Динамика изменения концентрации озono-воздушной смеси в топочной камере	98
3.4.6 Математическое описание импульсного режима подачи озono-воздушной смеси	101
3.4.7 Экспериментальные исследования горения в озонированной среде.....	103
3.5 Электрооборудование для ресурсо-энергосбережения в системах водоснабжения объектов АПК.....	108
3.5.1 Принцип построения автоматизированных систем коммерческого учета водопотребления	108
3.5.2 Энергосберегающая технология беспроводной передачи информации в автоматизированных системах коммерческого учета водопотребления	111

3.5.3 Исследование режимов работы пьезоэлектрических преобразователей кинетической энергии водного потока в блоках питания измерительно-передающих устройств	116
3.5.4 Разработка новых методов энергообеспечения измерительно-передающих устройств в автоматизированных системах коммерческого учета водопотребления	120
3.5.5 Энерго-ресурсосберегающий способ управления поливом	130
Выводы по главе 3	133
Глава 4. Способы и технические средства для ресурсо-энергосбережения при эксплуатации СВЧ-оборудования сельскохозяйственного назначения	138
4.1 Исследования распределения СВЧ-поля в рабочей камере и определение условий равномерного СВЧ-воздействия на обрабатываемые материалы.....	138
4.2 Разработка способов и технических средств защиты СВЧ-установок от аварийного режима	157
4.2.1 Состояние вопроса по автоматическому распознаванию аварийного режима СВЧ-генератора	157
4.2.2 Выявление зависимости формы кривой тока в цепи питания магнетрона от наличия нагрузки в рабочей камере	159
4.2.3 Моделирование переходных процессов в цепи анодного питания магнетрона при нормальном и аварийном режимах работы СВЧ-генератора	164
4.2.4 Технические решения по защите СВЧ-генераторов от аварийных режимов по форме кривой тока в цепи анодного питания магнетрона.....	169
4.2.5 Распознавание аварийного режима по уровню низкочастотного излучения	173
4.2.6 Емкостный метод распознавания аварийного режима.....	175
4.3 Стабилизация параметров СВЧ электромагнитного поля при меняющейся массе обрабатываемого материала	178
4.3.1 Разработка алгоритма управления микроволновым генератором	178
4.3.2 Совершенствование промышленных микроволновых установок периодического действия	183

Выводы по главе 4.....	185
Глава 5. Ресурсо-энергосбережение при использовании силовых ветроэнергетических установок.....	189
5.1 Оценка параметров многолопастных силовых ветродвигателей с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей	189
5.2 Определение коэффициента использования энергии ветра силовыми ветродвигателями	200
5.3 Повышение эффективности силовых ветродвигателей с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей	208
5.4 Уравновешивание силовых ветродвигателей со взаимно-перпендикулярными валами	213
5.5 Обоснование параметров уравновешивающей системы в силовых ветродвигателях со взаимно-перпендикулярными валами.....	219
5.6 Минимизация межосевого расстояния двухосевых силовых ветродвигателей.....	225
Выводы по главе 5.....	239
Глава 6. Перспективные направления разработки электротехнологических способов и технических средств ресурсо-энергосбережения в АПК.....	241
6.1 Энергосберегающее осушения воздуха на объектах АПК	241
6.2 Электротехнологические способы и технические средства ресурсосберегающего дражирования семян	246
6.3 Ресурсо-энергосберегающий способ аккумулирования энергии в системах автономного электроснабжения объектов АПК	251
6.4 Утилизация кинетической энергии жидких теплоносителей в безнасосных автономных отопительных системах	255
6.5 Ресурсосберегающий электротехнологический способ борьбы с варроатозом пчел.....	260
6.6 Векторы развития ресурсо-энергосберегающих электротехнологий в АПК	264
Выводы по главе 6:.....	270

Заключение.....	272
Список литературы	275
Приложения	329

Введение

Современное сельскохозяйственное производство сопровождается непрерывными материальными и энергетическими преобразованиями, происходящими с использованием разнообразных технических средств. При этом эффективность производства во многом зависит от качества этих преобразований, определяемого техническими, экономическими, экологическими и социальными факторами, а также их взаимным влиянием. К сожалению, расходование имеющихся энергетических и материальных ресурсов в АПК России происходит недостаточно рационально. Из 22 млрд кВт·ч электроэнергии, отпущенной сельскохозяйственному сектору экономики в 2021 г., 8 млрд кВт·ч оказались безвозвратно утраченными при передаче и в результате неэффективного использования. Доля автономных, экологически чистых источников энергии на селе не превышает 3 % из 3,1 т у.т., приходящихся на одного человека в АПК, около 0,8 т у.т. ежегодно теряется из-за несовершенства используемого оборудования. Потеря водных ресурсов в производственной сфере сельского хозяйства достигает 40 %, свыше 30 % используемых семян не образуют плодоносящих растений, велик риск выхода из строя неремонтопригодных элементов оборудования сельскохозяйственного назначения.

Перечисленные проблемы явились следствием отсутствия единой методологии в толковании вопросов эффективного использования энергетических и материальных ресурсов, несовершенства терминологии в обозначении форм преобразования энергии, механистического подхода к разграничению возобновляемых и невозобновляемых источников, а также несовершенства общего подхода к оценке эффективности и целесообразности применения источников с учетом изменения их характеристик во времени. Кроме того, на сегодняшний день нуждаются в существенном совершенствовании электротехнологические способы и технические средства для воздействия на биологические объекты, необходима разработка нового энерго-ресурсосберегающего оборудования для экономии водных ресурсов и эффективного отопления зданий и сооружений, для создания новых преобразователей энергии, повышающих до-

лю экологически чистого децентрализованного энергообеспечения объектов АПК.

Таким образом, разработка научно-обоснованной методологии энерго-ресурсосбережения в технологических процессах АПК, а также электротехнологических способов и технических средств соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в РФ, утвержденным Указом Президента Российской Федерации № 899 от 7 июля 2011 г.: п. 8 «Энергоэффективность и энергосбережение» согласуется с перечнем критических технологий РФ, утвержденных вышеназванным Указом, а именно п. 20 «Технология создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии» и является актуальной.

Степень разработанности темы. Существенный вклад в развитие современного представления о взаимном обращении энергии и материи в функции времени внес основатель теологии А. Пуанкаре. Гипотеза А. Пуанкаре о трехмерной сфере, доказанная Г.Я. Перельманом в 2002 г., дала возможность подтвердить теорию Большого Взрыва, и сделать заключение о единстве и бесконечности мировых запасов всех видов энергетических и материальных ресурсов. Основные закономерности распространения энергии в пространстве сформулированы Н.А. Умовым и Дж. Пойнтингом, а развитие физических взглядов по оценке эффективности энергетических преобразований принадлежит академику П.Л. Капице. Однако знания, полученные названными учеными, не претендуют на их использование в практике решения каждодневных инженерных задач.

Прикладные положения теории преобразования энергетических и материальных ресурсов сформулированы А.В. Лыковым и Л.А. Ленским. Вопросами управления энерго-ресурсосбережением в АПК активно занимались В.Я. Федянин и М.Е. Ерюков, глубокую проработку правовых аспектов использования автономных энергетических источников осуществила М.С. Шклярчук. Вместе с тем, результаты проведенных исследований не позволяют их использовать для сравнительной оценки эффективности разнотип-

ных преобразователей и не учитывают изменение их параметров во времени. Значительных успехов в создании энерго-ресурсосберегающих технологий в АПК и технических средств для их осуществления в разное время достигли И.Ф. Бородин, Н.В. Цугленок, П.Л. Лекомцев, А.В. Тихомиров, В.И. Загинайлов, В.Д. Мухин, А.А. Белов, Д.А. Михеев, С.П. Рудобашта, Д.А. Нормов и Я.Э. Пулатов. В то же время появление новой научно-технической информации по изучаемому вопросу, развитие материально-технической базы сельскохозяйственного производства, насыщение рынка высокопроизводительными и достаточно дешевыми средствами микроэлектроники позволяют сделать новые шаги в направлении совершенствования электротехнологических способов и технических средств ресурсо-энергосбережения в АПК.

Целью диссертационной работы является обоснование научно-методологических основ энерго-ресурсосбережения и разработка способов эффективного использования энергетических и материальных ресурсов в технологических процессах АПК.

Задачи исследования:

1. Произвести анализ современных научных концепций по проблеме эффективного использования материальных и энергетических ресурсов, обосновать методологию выбора направлений в обеспечении энерго-ресурсосбережения в технологических процессах АПК и разработать способ сравнительной оценки эффективности разнотипных материально-энергетических преобразований.

2. Разработать электротехнологические способы энерго-ресурсосбережения в системах тепло- и водообеспечения объектов АПК.

3. Разработать способы энерго-ресурсосбережения в микроволновом электрооборудовании сельскохозяйственного назначения.

4. Разработать методики расчета и оценки эффективности преобразования кинетической энергии воздушных потоков ресурсосберегающими силовыми ветродвигателями в составе ветроэлектростанций.

5. Обосновать перспективные направления разработки новых электротехнологических способов и технических средств обеспечения энерго-ресурсосбережения в технологических процессах АПК.

Объектом исследования диссертационной работы является эффективность энергетических и материальных преобразований, сопровождающих технологические процессы АПК.

Предметом исследования являются физические закономерности преобразования энергетических и материальных ресурсов при теплообеспечении объектов АПК, микроволновой обработке сельскохозяйственных материалов и генерировании электроэнергии в системах децентрализованного электроснабжения.

Научная новизна работы заключается в получении и систематизации новых знаний в области физики преобразования энергии и материи, позволивших анализировать разнотипные материально-энергетические преобразования в соответствии с законом сохранения и взаимного обращения массы и энергии с учетом зависимости эффективности этих преобразований от произведения плотности потока рассматриваемых субстанций и скорости их распространения в упругой среде, обосновать научно-методологические основы энерго-ресурсосбережения, разработать способ сравнительной оценки эффективности разнотипных материально-энергетических преобразований и решить ряд прикладных задач по сбережению энергетических и сырьевых ресурсов в технологических процессах АПК.

.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке:

– концепции выбора направлений в обеспечении энерго-ресурсосбережения в технологических процессах АПК и способа сравнительной оценки эффективности разнотипных материально-энергетических преобразований;

– ресурсо-энергосберегающего способа подключения грунтовых теплообменников в теплонасосных системах отопления в осциллирующем режиме, электротехнологического способа осаждения пыли в системах отопления с

обогреваемыми полами, методики расчета низкотемпературных децентрализованных систем отопления;

– электротехнологического способа интенсификации сжигания топлива в топках водогрейных котлов, математической модели импульсного озонирования топочной камеры и уравнений динамического баланса концентрации озона;

– способа построения энерго-ресурсосберегающей автоматизированной системы коммерческого учета воды при водоснабжении объектов АПК, способа определения условий возникновения вихревой дорожки Кармана при ламинарном течении воды в пьезоэлектрических преобразователях и способа преобразования энергии электромагнитного фона промышленного происхождения для питания электронных схем, способа динамической коммутации накопителей электрической энергии, ресурсо-энергосберегающего комбинированного способа управления поливом по отклонению фактической влажности почвы от заданного значения, возмущающим воздействиям и прогнозу выпадения осадков;

– способа экспериментально-теоретического определения эквинапряженного пространства в рабочей камере микроволнового электрооборудования циклического действия, ресурсосберегающих способов распознавания аварийных режимов и алгоритма управления микроволновым генератором;

– методики расчета ресурсосберегающих ветродвигателей с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей и многолопастных ветродвигателей, использующих силовые свойства ветра, методики определения минимально допустимого межосевого расстояния двухосевых ресурсосберегающих ветродвигателей;

– перспективных направлений научных исследований по созданию электротехнологических способов и технических средств энерго-ресурсосбережения в производственных процессах АПК, в частности:

1) способов осушения воздуха;

- 2) способа оценки качества дражирования семян и определения их размеров без остановки производственного процесса;
- 3) способа дражирования семян в непрерывном режиме и методики расчета рабочих параметров дражиратора с ленточным рабочим органом;
- 4) способа использования инерционных накопителей энергии в системах автономного энергообеспечения стационарных объектов АПК;
- 5) способа утилизации кинетической энергии теплоносителя в автономных отопительных системах;
- 6) способа проведения противоварроатозных мероприятий с применением электромагнитных полей.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования ее результатов при разработке энерго-ресурсосберегающих преобразователей энергии и материальных ресурсов в системах энергообеспечения объектов АПК, при проектировании энерго-ресурсосберегающих систем отопления, в том числе систем отопления с грунтовыми тепловыми насосами и обогреваемыми полами, при разработке ресурсосберегающих газовых водогрейных котлов с озоновым наддувом и проектировании энерго-ресурсосберегающих систем водообеспечения, при разработке ресурсосберегающих микроволновых установок сельскохозяйственного назначения с управляемыми режимами обработки и автоматическим отключением при возникновении аварийного режима, и проектировании энерго-ресурсосберегающих преобразователей кинетической энергии ветра, при разработке энергосберегающих установок для осушения воздуха, ресурсосберегающих дражираторов семян сельскохозяйственных растений, инерционных накопителей энергии для систем автономного энергообеспечения стационарных объектов АПК, утилизации кинетической энергии теплоносителя в автономных системах отопления, а также электротехнологического оборудования для борьбы с варроатозом пчел.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач использовались элементы системного анализа, в частности: материальные,

информационные, математические и языковые средства познания, методы физических аналогий, абстрагирования и индукции. Применялись методы математического анализа, моделирования, математической статистики, сведения из теории классической электротехники, физической химии, теоретической механики и теории автоматического управления. В работе широко использовались современные цифровые вычислительные средства с языками программирования Python, Visual Basic, JavaScript, C++, а также гибридная аналого-цифровая вычислительная машина «Экстрема-1». Обработка результатов исследований выполнена с применением программного обеспечения Visual Studio Code, Microsoft Excel.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные научно-методологические основы энергоресурсосбережения, базирующиеся на установленных физических закономерностях и их взаимосвязях, позволяют определять актуальные направления разработки новых способов рационального использования энергетических и материальных ресурсов в технологических процессах АПК, а также осуществлять сравнительную оценку преобразований с учетом плотности и скорости субъектов процесса, а также стереометрических показателей преобразователей.
2. Использование осциллирующего режима подключения грунтовых теплообменников при эксплуатации электрифицированных систем отопления с тепловыми насосами обеспечивает сбережение энергии и исключает отрицательные экологические последствия.
3. Подача озono-воздушной смеси в топочные камеры маломощных газовых водогрейных котлов в соответствии с разработанным режимом определяет снижение затрат топлива и улучшает состав продуктов сгорания.
4. Повышение материальной и энергетической эффективности сельскохозяйственного водоснабжения достигается посредством использования разработанной автоматизированной системы коммерческого учета водопотребления, оснащенной энергосберегающими измерительно-

передающими устройствами, реализацией энергоэффективного способа связи и разработанного способа управления поливом.

5. Использование разработанного способа определения эквинапряженного объема в рабочей камере, методики стабилизации СВЧ-воздействия при изменении массы обрабатываемых материалов, а также способов автоматической защиты магнетронов от аварийных режимов обеспечивает сбережение энергетических и материальных ресурсов при эксплуатации микроволнового электрооборудования.
6. Разработанные методики расчета многолопастных силовых ветродвигателей, ветродвигателей с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей, также методика минимизации межосевого расстояния двухосевых силовых ветродвигателей в составе ветроэлектрических станций позволяет разрабатывать устройства преобразования кинетической энергии ветра, обеспечивающие сбережение энергетического и пространственного ресурсов.
7. Энергосберегающее осушение воздуха на объектах АПК достигается использованием разработанного способа регенерации силикагеля в озонной среде, ресурсосберегающая подготовка семян к посеву обеспечивается применением предложенного электротехнологического способа дражирования в непрерывном режиме с автоматическим определением размеров драже по диэлектрической проницаемости рабочей среды, энергосберегающее аккумулярование энергии в автономных системах энергообеспечения стационарных потребителей реализуется применением инерционных накопителей в соответствии с разработанной методикой расчета.

Реализация результатов исследований. По результатам исследований изготовлены работоспособные установки для микроволновой обработки сельскохозяйственных материалов и переданы для эксплуатации в Киргизскую опытно-селекционную станцию по сахарной свекле. Разработано техническое задание на устройство защиты от аварийных режимов источника

СВЧ-энергии сельскохозяйственного назначения. Техническое задание утверждено Министерством электронной промышленности СССР и ВАСХНИЛ и передано предприятию-изготовителю. Результаты научных исследований осциллирующего режима подключения грунтовых теплообменников к испарительному контуру теплового насоса по патентам РФ № 140455 U1, МПК F24D3/08 (2006/01), опубл. 10.05.2014 и № 149505 U1, МПК F24D12/02, (2006/01), опубл. 10.01.2015 переданы ЗАО «Компания «СвязьИнТех», являющегося официальным представителем фирмы NIBE Energy System, для использования при проектировании и монтаже системы обогрева теннисного корта в соответствии с актом внедрения от 09.11.2016. Техническая документация на изготовление электронезависимых газовых водогрейных котлов с озоновым наддувом передана для использования на специализированное производственное предприятие ООО «Термофор» и проектно-исследовательское предприятие ООО «ТехноПромСервис» (г. Новосибирск). Результаты проведенных исследований в области сбережения водных и энергетических ресурсов внедрены на объектах ООО «ЭнергоСтандарт» (Московская область) и используются в учебном процессе по дисциплине «Гидравлика» кафедры «Техническая эксплуатация автомобилей» ФГБОУ ВО Тверская ГСХА. Промышленные испытания образца вихревого расходомера проведены на объектах ОАО НТП «СФЕРА».

Достоверность исследований. Степень достоверности основных положений и выводов подтверждена: результатами экспериментальных исследований процессов преобразования энергетических и материальных ресурсов в электрогенерирующих установках, в системах водообеспечения и автономного теплообеспечения объектов АПК, микроволновых установках сельскохозяйственного назначения, электрифицированных установках для предпосевной обработки семян, а также при аккумулировании энергии, использованием современных методик, ГОСТов, и измерительных приборов.

Научная апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 126 научных, научно-практических и научно-

технических всесоюзных, всероссийских и международных конференциях, симпозиумах и семинарах, в том числе проводимых: МИИСП имени В.П. Горячкина в 1982–1993 гг.; МГАУ имени В.П. Горячкина в 1993–2015 гг.; РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в 2015–2020 гг.; Центральным и Латвийским правлением НТО с.-х. в 1985 г.; Московским технологическим институтом мясомолочной промышленности в 1985 г.; Саратовским политехническим институтом в 1986 г.; Всесоюзным советом научно-технических обществ и Комитетом ВСНТО по автоматизации и механизации производственных процессов в 1987 г.; Центральным и Белорусским республиканским правлением Всесоюзного государственного агропромышленного научно-технического общества в 1989 г.; Всесоюзным сельскохозяйственным институтом заочного образования в 1989 г.; Государственным Комитетом СССР по науке и технике в 1990 г.; Всероссийским институтом механизации сельского хозяйства в 1997, 2012 г.; Институтом охраны окружающей среды Республики Осетия в 1998 г.; Всероссийским институтом электрификации сельского хозяйства в 1998, 2012, 2014, 2016 г.; Саратовским государственным аграрным университетом имени Н.И. Вавилова в 2011, 2012 г.; Пензенской государственной сельскохозяйственной академией в 2011, 2012, 2015, 2016 г.; ФГОУ ВПО Ставропольским государственным аграрным университетом в 2011 г.; Воронежской государственной технологической академией в 2011 г.; Юго-Западным государственным университетом в 2011, 2012, 2014–2017 гг.; Бурятской государственной сельскохозяйственной академией им. В.Р. Филиппова в 2011 г.; Саратовским государственным техническим университетом в 2011 г.; Санкт-Петербургским политехническим университетом в 2012 г.; Санкт-Петербургским государственным аграрным университетом в 2012 г.; ФГБОУ ВПО Вятской государственной сельскохозяйственной академией в 2013 г.; Брянским научно-техническим центром «НДМ» в 2014 г.; Смоленской государственной сельскохозяйственной академией в 2013, 2015 г.; ФГБОУ ВПО Мичуринским государственным аграрным университетом в 2014 г.; Инновационным центром развития образования и науки в 2015, 2016 г.; Международным центром научного сотрудничества «Наука и

просвещение» в 2016–2022 гг.; ФГБОУ ВО Чувашским государственным университетом имени И.Н. Ульянова в 2017 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 270 печатных работ, в том числе 60 в изданиях из перечня ведущих периодических изданий, определенных ВАК РФ Министерства науки и образования Российской Федерации, 2 в международной базе цитирований Scopus, 57 авторских свидетельств и патентов на изобретения и полезные модели, 6 монографий.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, общего заключения и списка литературы из 369 наименований, 4 приложений из 135 позиций, включает 388 страниц, 36 рисунков и 4 таблицы.

Глава 1. Состояние энерго-ресурсосбережения в АПК

1.1 Постановка вопроса по реализации проблемы энерго-ресурсосбережения в АПК в современных научных исследованиях

Несмотря на очевидные успехи последних десятилетий РФ в экономии материальных и энергетических ресурсов, следует отметить, что в сельскохозяйственном производстве резервы ресурсо-энергосбережения далеко не исчерпаны. При этом нерациональное использование различных видов материальных и энергетических ресурсов проявляется не только при реализации известных технологий, но и при создании новых способов и средств производства вследствие неправильных представлений о принципах ресурсо-энергосбережения. Довольно часто разработка технологических приемов и технических средств для их осуществления происходит с позиций сугубо узких интересов и не предполагает учета ряда взаимосвязанных факторов, учитывающих не только экономические, но также социальные и экологические требования. При оценке баланса материальных или энергетических ресурсов не учитывается изменчивость составляющих этого баланса с течением времени. Слабо принимаются во внимание вопросы природной релаксации ресурсов, скорости ресурсо-энергетических преобразований и связанные с ними экологические последствия.

Современный взгляд на материальные и энергетические ресурсы не предусматривает единого подхода к их оценке и безусловной возможности к взаимному преобразованию. Например, не выдерживает критики распространенная классификация энергетических источников на «возобновляемые» и «невозобновляемые» [88,52]. Принятые способы оценки эффективности ресурсных или энергетических преобразований часто не учитывают их динамические свойства. При оценке эффективности преобразователей используются частные показатели, не позволяющие сравнивать разнотипные источники и потребители ресурсов. Интенсивное развитие новых технических решений часто сдерживается консервативными взглядами. Например, несмотря на явную стадию насыщения развития химических накопителей электрической энергии, ученые не уделяют доста-

точного внимания на исследование иных принципов. Недостаточно распространена практика использования вторичных объемов материалов или энергии, освобождающихся при протекании основных производственных процессов. Неоправданное увлечение «модными» приемами, поддерживаемые недобросовестной рекламой, часто отвлекает исследователей от решения насущных задач. Например, несмотря на полуторавековую историю развития компрессионной холодильной техники, идеи использования тепловых насосов буквально для всех известных теплотехнических процессов подается как научная сенсация, требующая немедленной реализации. При этом не принимаются во внимание ограничения в теплопроводности материальных носителей тепловой энергии, их теплоемкость, а также экологические факторы. Не менее досадны попытки использования способов энергетических преобразований при крайне низких плотностях энергетических потоков. Отсюда следуют предложения по применению термоэлектрических элементов для преобразования тепловой энергии в электрическую на границах материальных сред с малоотличающимися температурами. К сожалению, увлекаясь идеями использования оригинальных и, на первый взгляд – эффективных технических приемов, исследователи в ряде случаев упускают из виду их практическую ценность. К таким идеям можно отнести попытки получения энергии за счет использования восходящих воздушных потоков в вертикальных трубах, установки ветродвигателей на летательных аппаратах легче воздуха и т.п.

При всем многообразии технологических процессов в АПК вопросы энерго-ресурсосбережения затрагивают четыре вида искусственных манипуляций с материальными и энергетическими ресурсами: преобразование энергии из одного вида в другой, преобразование энергии в материальные субстанции, преобразование материальных ресурсов в энергию и материальных ресурсов в материальную продукцию. Сюда же относится аккумуляция этих субстанций в материальной или энергетической формах, а также их возможная релаксация. Во всех перечисленных случаях вопросы энерго-ресурсосбережения решаются индивидуальным образом, однако для повышения эффективности разработки новых

способов необходим общий методологический подход, базирующийся на едином понимании принципов материально-энергетических преобразований. В настоящей работе сделана попытка формирования научно-методологических основ создания новых способов энерго-ресурсосбережения в технологических процессах АПК. Эти основы должны характеризоваться единой системой научных взглядов на многообразие физических процессов и явиться каркасом выстраивания направлений исследований при поиске новых способов эффективного использования энергетических и материальных ресурсов. Достоверность методологических основ должна быть проиллюстрирована положительным опытом их использования при создании способов энерго-ресурсосбережения во всех обозначенных формах преобразований.

1.2 Актуальность разработки электротехнологических способов и технических средств энерго-ресурсосбережения в системах теплоснабжения объектов АПК

Суровые климатические условия РФ определяют значительные затраты энергии на отопление в производственном и жилом секторах. В среднем по стране энергозатраты на отопление достигают 70% от общего объема производимой энергии. На сегодняшний день обеспечение теплового режима объектов АПК реализуется двумя способами: централизованным и децентрализованным (автономным). Согласно СНиП 41-02-2003 [353] система централизованного теплоснабжения состоит из одного или нескольких источников теплоты, тепловых сетей (независимо от диаметра, числа и протяженности наружного теплопровода) и потребителей теплоты [352]. В то же время в соответствии со СНиП 41-01-2003 к децентрализованному теплоснабжению (ДЦТ) относятся индивидуальные (автономные) теплогенерирующие устройства любой мощности и конструкции, обеспечивающие теплом одно сооружение, в котором они установлены [351].

В структуре малоэтажной застройки в условиях сельской местности преобладает тенденция использования децентрализованного теплоснабжения

(таблица 1 приложения А) [115,89]. В качестве основных доводов в его пользу можно назвать: отсутствие значительных капиталовложений на строительство теплотрасс, сокращение потерь тепловой энергии при ее передаче на большие расстояния и возможность локального регулирования температуры в каждом отапливаемом помещении. Кроме того, при децентрализованном теплоснабжении значительно снижается площадь полезно изымаемых земель, используемых для нужд сельского хозяйства. В работе [186] произведен анализ причин отчуждения земель при централизованном теплоснабжении животноводческих помещений и определены выражения для количественной оценки фактических длин теплоподводящих трубопроводов с учетом норм их прокладки с коррекцией на обход препятствий (рисунок 1 приложения В). Здесь же обоснован показатель кратности увеличения протяженности теплотрасс и сделан вывод о его повышении с уменьшением размеров препятствий. Кроме того, в связи с высокой рассредоточенностью отапливаемых объектов, целесообразность перехода на децентрализованное теплоснабжение в сельской местности еще более очевидна. Таким образом, перечисленные факты и тенденции позволяют сделать вывод о возрастающей роли автономного теплоснабжения в течение ближайших лет.

Поддержание требуемой температуры на объекте может быть достигнуто при различных сочетаниях температуры теплоносителя и размеров теплообменных аппаратов. Однако выбор этого сочетания обычно осуществляется интуитивно и не всегда оказывается рациональным. При этом во избежание невыполнения основной функции системы отопления – обогрева помещений – в процессе их проектирования или эксплуатации устанавливаются несколько завышенные задающие значения температуры, что приводит к перерасходу топливных или энергетических ресурсов. Поэтому разработка алгоритма выбора оптимального сочетания температуры теплоносителя и рабочей поверхности теплообменников с учетом технических и экономических факторов является актуальной.

Активное развитие теплонасосных систем автономного отопления типа «грунт-воздух» в последнее время сдерживается чрезмерной тепловой перегруз-

кой грунта, в результате которой в зимнее время происходит его переохлаждение. Переохлаждение грунта приводит к гибели растений, уничтожению почвенной фауны и разрушению подземных элементов строительных конструкций. Поэтому весьма важной задачей является исследование динамики теплообменных процессов в грунтовой среде и разработка эффективного способа извлечения тепловой энергии без экологического и хозяйственного ущерба.

Существенным препятствием развития низкотемпературных систем отопления, в частности, с использованием обогреваемых полов, является появление в отапливаемых помещениях взвешенной пыли. Под действием восходящих потоков теплого воздуха пыль поднимается с поверхности обогреваемых полов и сосредотачивается на уровне органов дыхания людей [283]. Известные на сегодня способы физической или электрофизической очистки воздуха, а также способы осаждения пыли являются неудобными в эксплуатации и весьма энергоемкими.

Несмотря на успехи в области конструирования газовых водогрейных котлов малой мощности на сегодняшний день остается нерешенной проблема тщательного соблюдения коэффициента избытка воздуха в топочной камере. К сожалению, современные конструкции атмосферных горелок не могут обеспечить требуемое соотношение газа и воздуха, а использование в качестве окислителя кислорода остается экономически нецелесообразным. В то же время несоблюдение требуемого значения коэффициента избытка воздуха приводит к перерасходу газа и ухудшает экологические показатели продуктов сгорания. Поэтому сегодня необходим новый подход к созданию условий интенсивного горения газа. Многообещающим приемом, обеспечивающим качественное горение с улучшенными экологическими показателями, озонирование пространства топочной камеры. Однако ввиду слабой изученности процесса и отсутствия соответствующих технических средств использование озона широкого применения не получило.

Современные водопроводные сети сельского назначения характеризуются большими потерями водных ресурсов из-за несанкционированного расхода, протечек и значительных затрат времени на их обнаружение [348]. Кроме того, отсутствие оперативной информации о масштабах водопотребления в реальном

времени не позволяет грамотно планировать и согласовывать графики расхода и подачи воды. Большие перерасходы водных ресурсов приходится на оросительные системы вследствие недостаточной гибкости алгоритмов управления поливом, которые не предусматривают одновременный учет фактической влажности почвы и возмущающих факторов. Кроме того, все существующие на сегодня способы управления поливом не предусматривают автоматического учета прогноза выпадения осадков. Последнее в ряде случаев приводит к существенному перерасходу электроэнергии и водных ресурсов. Таким образом, задача разработки комплекса мер по снижению расхода водных и энергетических ресурсов при водообеспечении объектов АПК является актуальной.

1.3 Актуальность разработки технических средств для энергоресурсосбережения при эксплуатации СВЧ-оборудования сельскохозяйственного назначения

Современная электротехнология производственных процессов АПК представляет собой совокупность способов и технологических приемов использования электрических и магнитных полей, электрического тока, электрических зарядов и других электрофизических факторов на материалы, живые организмы, растения и продукты с целью достижения в них целенаправленных изменений. Одно из перспективных направлений электротехнологий основано на использовании электромагнитной энергии сверхвысокой частоты. Это направление появилось в середине шестидесятых годов XX века и в настоящее время нашло отражение во многих традиционных и вновь созданных технологических процессах АПК [241].

Практическое использование СВЧ-энергии обусловлено двумя доказанными проявлениями, одно из которых является тепловым, а другое – специфическим (биологическим). На сегодняшний день наиболее изученный и наиболее используемый эффект основан на тепловом воздействии СВЧ-энергии на материальные объекты. Суть эффекта заключается в выделении теплоты при дипольной поляризации молекул обрабатываемых веществ. При этом наибольший эффект достигается при воздействии на полярные вещества, молекулы которых являются естественными диполями (вода, растворы щелочей, кислот и др.). Диполи начинают

ориентироваться вдоль вектора электрической напряженности внешнего поля. Если это поле является переменным, то молекулы будут совершать вынужденные колебания. Энергия внешнего поля расходуется на преодоление межмолекулярного трения и трансформируется в теплоту. Эффективность СВЧ-воздействия в значительной степени зависит от точности его дозирования. При проектировании микроволновых установок периодического действия повышенное внимание уделяется вопросу обеспечению равномерности воздействия СВЧ-энергии на обрабатываемые материалы [166, 59, 110, 123, 124, 233]. Для достижения равномерности в установках предусматриваются различные мешалки, ворошители и т. п. В бытовых печах используются вращающиеся подставки, на которых размещаются обрабатываемые продукты. При тепловой обработке пищевых продуктов эта мера оказывается достаточной, поскольку требования к равномерности нагрева невысоки. К тому же конечная температура различных частей нагреваемых продуктов через некоторое время выравнивается за счет теплообмена. В то же время при обработке биологических материалов, основанной на специфическом воздействии, механическое перемещение обрабатываемых объектов положительного результата не дает. Второй прием основан на использовании стиреров – электромеханических устройств, содержащих вращающиеся лопасти, установленные в волноводе. Поток СВЧ-энергии, взаимодействуя со вращающимися лопастями сложной конфигурации, отражается под изменяющимся углом и направляется в различные точки рабочей камеры. Иногда работа стиреров автоматизируется и синхронизируется с устройствами контроля процесса СВЧ-воздействия, однако и в этих случаях неравномерность поля в различных областях рабочей камере остается на уровне 20...25 %.

При проведении СВЧ-обработки операторам приходится находить компромисс между производительностью процесса, и точностью дозирования воздействия. Повышение производительности достигается увеличением количества обрабатываемого материала, а сокращение разброса величины дозы в каждой точке – его уменьшением. Обычно эта процедура осуществляется «на глаз» и ее успех определяется опытом и добросовестностью оператора. Вместе с тем, ввиду многообразия

микроволновых установок периодического действия, а также множества режимов воздействия создание единых рекомендаций по выбору количества обрабатываемых материалов едва ли возможно. В связи с этим приобретает актуальность разработки общей методики определения рабочего объема в камере микроволновой установки, характеризующегося близкими значениями напряженности поля. Нерешенность обозначенной проблемы определяет возникновение двух последствий: неоправданную утрату обрабатываемых материалов и перерасход энергии. Утрата материалов (ресурсов) происходит из-за неправильного дозирования СВЧ-воздействия. При этом повышенная доза обработки определяет появление негативного эффекта, проявляющегося в недопустимых изменениях биофизических и иных свойств материалов. Эти изменения в ряде случаев делают необходимой отбраковку таких материалов, поскольку их последующее использование бессмысленно и связано с новыми материальными и временными затратами. Например, известно, что превышение установленной дозы воздействия СВЧ-энергии на семена овощных культур на 7 % приводит к снижению урожайности на 20 % [67].

Аналогично утрачиваются ресурсы при недостаточно интенсивной СВЧ-обработке. Поскольку доза воздействия, приходящаяся на часть обрабатываемых материалов, меньше установленной, эти материалы не получают требуемых изменений свойств и их использование в принятых технологиях становится неэффективным. Поскольку СВЧ-обработка материалов сопровождается затратами энергии, можно сделать вывод, что вся энергия, затраченная на обработку отбракованных объектов, оказывается потерянной. Именно поэтому вопрос обеспечения равномерности СВЧ-воздействия является частью проблемы энерго-ресурсосбережения в микроволновых установках сельскохозяйственного назначения.

Вторым фактором, существенно сдерживающим широкое использование СВЧ-технологий, является несовершенство микроволновых установок, проявляющееся в изменении соотношения поглощенной и отраженной электромагнитной энергии при несогласованной нагрузке. К сожалению, характеристики электрического поля, создаваемого в рабочих камерах, сильно зависят от массы, объе-

ма и диэлектрических свойств обрабатываемых материалов. Для обеспечения требуемой дозы воздействия конструкторы микроволновых установок стремятся создавать условия, при которых количество материалов в рабочей камере в процессе обработки было бы одинаковым. Однако выполнить это требование непросто. Во-первых, в начале и в конце обработки каждой партии материала в рабочей камере их всегда будет меньше, чем в рабочем режиме. Во-вторых, даже если добиться постоянства объема обрабатываемых материалов, весьма проблематично стабилизировать их влажность, начальную температуру или плотность укладки на транспортере.

При значительном рассогласовании поглощенной и отраженной энергии, возникающем, например, при отсутствии обрабатываемых материалов в рабочей камере, во всех микроволновых установках возникает аварийный режим. Аварийный режим сопровождается перегревом катода магнетрона и быстрым выходом его из строя. Стоимость магнетрона обычно составляет 15...30 % стоимости всей микроволновой установки. Кроме того, замена магнетрона производится в условиях специализированных мастерских силами квалифицированных специалистов. Принимая во внимание последние обстоятельства, можно сделать вывод, что в условиях сельского хозяйства выход из строя магнетрона является крайне нежелательным явлением, противоречащим принципу ресурсосбережения.

Следует отметить, что на практике аварийные режимы возникают довольно часто. Причиной аварийных режимов обычно бывают ошибочные действия оператора, который выполняет монотонные операции, устает и допускает нарушения технологии. К сожалению, аварийные режимы не сопровождаются какими-то легко заметными проявлениями: звуками, высокой температурой, дымом и т. п. Вследствие этого оператор обычно узнает о возникновении аварийной ситуации уже после СВЧ-обработки очередной порции продукта. Именно поэтому вопрос автоматического распознавания аварийных режимов решает одну из проблем ресурсосбережения и является актуальным.

1.4 Актуальность ресурсо-энергосбережения при использовании силовых ветродвигателей

Для электроснабжения удаленных сельскохозяйственных потребителей в ряде случаев удобно использовать возобновляемые источники энергии. К таким потребителям относятся овощехранилища, складские помещения, а также небольшие производственные объекты. В климатических условиях Средней полосы России в качестве преобразователей возобновляемой энергии могут выступать солнечные установки и ветродвигатели.

Наряду с ветродвигателями, использующими скоростные свойства ветра (т.н. скоростными ветродвигателями), работающими за счет воздействия подъемной аэродинамической силы, определенный сегмент современного рынка ветроустановок составляют устройства, в которых направления ветрового потока и движения лопастей совпадают. Такие устройства принято считать ветродвигателями, использующими силовые свойства ветра (силовыми ветродвигателями). К ним относятся карусельные, барабанные, чашечные конструкции, а также ветродвигатели Савониуса и Лафонда. Ветроустановки перечисленных типов менее эффективны, однако они имеют относительно высокий момент трогания, что делает их востребованными при эксплуатации на местности с невысоким ветровым потенциалом [97]. Кроме того, конструкции силовых ветродвигателей очень просты, из-за чего они легко осваиваются в производстве или воспроизводятся в условиях фермерских электромеханических мастерских. В отличие от ветродвигателей, использующих скоростные свойства ветра, лопасти рассматриваемых конструкций в разные моменты времени испытывают различные давления воздушного потока. Это происходит вследствие поворота лопастей и изменения угла между ними и направлением потока. И если геометрические размеры лопастей остаются постоянными, то их активные поверхности в пределах каждого периода изменяются от максимального значения практически до нуля. На рисунке 1.1 представлен общий вид барабанного ветродвигателя с горизонтальной осью. Нетрудно заметить, что при направлении ветра, показанном стрелками, лопасти второго и

третьего квадрантов испытывают одинаковое давление. Вместе с тем, вращающиеся моменты, образующиеся при взаимодействии ветра с лопастями такого ветродвигателя, направлены в противоположные стороны, и их алгебраическая сумма равна нулю. Для обеспечения работоспособности барабанных ветродвигателей используют заградительные экраны, установленные так, как показано на рисунке 1.1. Благодаря заградительному экрану устраняется влияние ветра на лопасти третьего квадранта и нарушается равенство вращающихся моментов, что приводит ветроколесо во вращение.

Несмотря на свою длительную историю, силовые ветродвигатели на сегодняшний момент изучены достаточно слабо. Например, до сих пор остается неясной зависимость параметров этих устройств от количества парных лопастей, а также не разработана методика определения коэффициента использования ветра и других параметров.

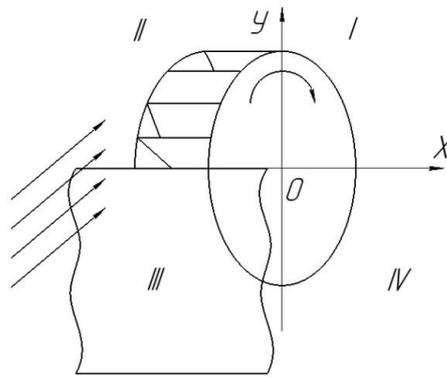


Рисунок 1.1. Общий вид ветродвигателя, использующего силовые свойства ветра

Особое место в классе силовых ветродвигателей занимают конструкции с вертикальным валом, в которых периодическое изменение активной поверхности лопастей осуществляется за счет их дополнительного движения под действием силы тяжести. Эти ветродвигатели не требуют ориентирования в пространстве по направлению ветра и позволяют существенно снизить расход материалов на изготовление. Работоспособность рассматриваемых ветродвигателей обеспечивается разностью вращающихся моментов, создаваемых противоположно расположенными лопастями. При работе ветродвигателей со взаимно-перпендикулярными валами их лопасти периодически выводятся из

зоны воздействия ветра, что достигается их поворотом относительно горизонтального вала и обращением ребром к ветровому потоку. При этом лопасти совершают сложные движения: вращательное относительно вертикальной оси и возвратно-вращательное относительно горизонтальной.

На сегодняшний день существует множество технических решений, реализующих класс таких ветродвигателей. Однако исследования распределения вращающих моментов и анализ преобразования кинетической энергии потока в механическую форму пока не производились. Опыт эксплуатации силовых ветродвигателей с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей показал, что эффективной мерой повышения пускового момента может стать статическое уравнивание лопастей. Уравнивание лопастей позволяет расширить диапазон рабочих скоростей ветра и снизить пульсации. Во избежание усложнения конструкций, рассматриваемые ветродвигатели обычно не оснащаются дополнительными исполнительными механизмами с внешним питанием. Переориентация лопастей в таких ветродвигателях происходит за счет вращающего момента, образуемого в результате воздействия силы тяжести. Поскольку условия, при которых образуется этот момент, определяются основным движением лопастей, можно утверждать, что часть преобразованной энергии расходуется на «обслуживание» самого ветродвигателя. Поэтому с позиции энергосбережения эта часть энергии должна быть минимизирована. На практике уравнивание ветродвигателей обычно производится произвольно, в соответствии с интуицией оператора. Такой подход не обеспечивает гарантии достижения положительного результата и при неудачной реализации в крупных ветродвигателях может явиться причиной аварий. Поэтому актуальной задачей на пути совершенствования силовых ветродвигателей остается исследование механизма их статического уравнивания и разработка рекомендаций по его осуществлению.

Характерная особенность силовых ветродвигателей заключается во взаимноперпендикулярном расположении оси вращения ветроколеса и направления

ветра [357]. При этом положение оси относительно земной поверхности (вертикальное или горизонтальное) принципиального значения не имеет.

Очевидно, что ветродвигатель, изображенный на рисунке 1.1 малоэффективен, поскольку в нем полезную работу выполняет только одна четвертая часть общего количества лопастей. Вращение остальных лопастей совершеном работы не сопровождается. Некоторое решение обозначенной проблемы может быть достигнуто в двухосевом ветродвигателе с частичным взаимным перекрытием лопастей, как показано на рисунке 1.2.

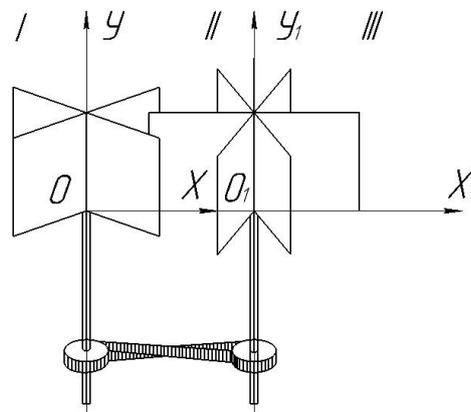


Рисунок 1.2. Схема двухосевого ветродвигателя с частичным взаимным перекрытием лопастей.

Двухосевой ветродвигатель содержит два одинаковых многолопастных элемента, оси которых параллельны и удалены друг от друга на минимально возможное расстояние. В первом и четвертом квадрантах системы координат YOX , а также во втором и третьем квадрантах системы $Y_1O_1X_1$ лопасти многолопастных элементов частично перекрываются. Оба многолопастных элемента связаны между собой механической (шестеренчатой или цепной) передачей с отрицательным передаточным отношением. Последнее обеспечивает возможность вращения многолопастных элементов исключительно в противоположные стороны.

Для изучения реакции лопастей на ветровой поток, перпендикулярный плоскости YOX , разобьем зону из взаимодействия с ветром на три участка: I, II и III. Очевидно, что суммарный вращающий момент, образуемый лопастями

на участках I и III превышает вращающий момент на «перекрываемом» участке II. При направлении ветра «от плоскости изображения рисунка на читателя» правый многолопастной элемент начнет вращаться по часовой стрелке, а левый – против. Таким образом, для работы двухосевого ветродвигателя заградительный экран является желательным, но не обязательным элементом конструкции [2].

Принимая во внимание ценность используемого пространства, как ограниченного ресурса, легко заметить, что с увеличением расстояния между осями Y_0 и Y_1 эффективность использования ветродвигателя снижается. При превышении межосевым расстоянием значения суммы длин двух лопастей правого и левого многолопастных элементов эффект «перекрывания» исчезает и двухосевой ветродвигатель распадается на два одноосевых. Если двухосевой ветродвигатель оснащен заградительным экраном, как показано на рисунке 1.3, то вследствие устранения тормозящего вращающего момента, образуемого на участке II эффективность его использования возрастет. Кроме того, заградительный экран в последнем случае выполняет роль направляющего крыла, концентрирующего ветровой поток. При наличии заградительного экрана наибольшая эффективность использования двухосевого ветродвигателя также будет достигаться при минимальном расстоянии между осями.

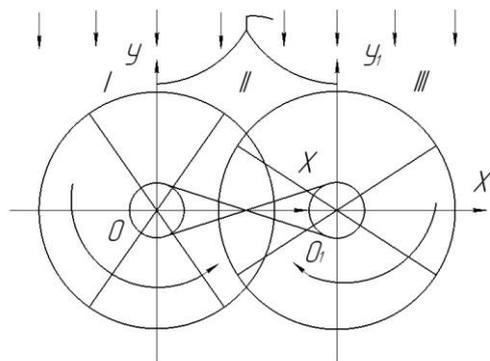


Рисунок 1.3. Расположение заградительного экрана в двухосевом ветродвигателе

Это объясняется тем, что с сокращением межосевого расстояния габариты и масса ветродвигателя уменьшаются, а механическая передача упрощается. В

свете перечисленных соображений можно заключить, что рассматриваемый двухосевой ветродвигатель является ресурсосберегающим, а минимизация его межосевого расстояния представляет собой важную оптимизационную задачу.

Выводы

1. Анализ технологических процессов современного АПК показал необходимость повышения их энергетической и сырьевой эффективности.
2. Для обоснования направлений исследований по изысканию резерва экономии материальных и энергетических ресурсов в технологических процессах АПК необходима разработка методологических основ энерго-ресурсосбережения, базирующихся на научном анализе и объективном понимании физической сущности преобразований, а также способа сравнительной оценки их эффективности.

Глава 2. Обоснование научно-методологических основ энерго-ресурсосбережения в технологических процессах АПК

За основу разрабатываемой методологии энерго-ресурсосбережения в технологических процессах АПК был принят закон сохранения материи и энергии, а также критерии плотности и скорости распространения потока, предложенный академиком П.Л.Капицей. Предложено рассматривать плотность потока как функцию двух аргументов: скорости изменения объема среды v (деформации) и плотности энергии F . Эта функция определяет векторное произведение $U = vF$, а в стационарном режиме записывается в виде $divU$. Функция U характеризует преобразованную энергию, являющуюся результатом использования источника. Для удовлетворения уравнению непрерывности $divS + \frac{dw}{dt} = 0$ предложено использовать вектор Умова (S). При направленном движении энергии образуется поток, среднюю плотность энергии которого w предложено рассматривать как отношение полной энергии к объему сосредоточенного в источнике объема энергии. При преобразовании энергии, сопровождающимся снижением ее уровня, происходит уменьшение потенциальной энергии с одновременным увеличением кинетической энергии потока. Аналогично плотность потока энергии может быть представлена его отношением к поперечному сечению условного проводника потока: $S = wv$. Из последнего несложно сделать вывод о пропорциональности плотности потока скорости движения. Таким образом, с помощью вектора Умова S описывается перенос энергии в пространстве конвективным образом. Аналогичный взгляд может быть применен при рассмотрении перемещения электрического заряда в пространстве под влиянием энергии поля. В таком случае процесс соответствует вырожденному решению волнового уравнения. Все вышеприведенные рассуждения предлагается распространить и на движение материальных сред. В таком случае в математическом описании процесса будут участвовать иные физические величины и их количественные взаимосвязи, однако основные закономерности преобразований останутся прежними.

Подавляющее большинство технологических процессов современного АПК сопровождается взаимным преобразованием различных видов материальных и энергетических ресурсов [229, 119, 151, 343]. При этом конечной целью этих преобразований могут являться как превращение энергии в удобный для последующего использования вид, так и получение материальной продукции. По существу все известные разнотипные преобразования ресурсов могут идти по следующим направлениям:

- преобразование одного вида энергии в другой (работа гидро-ветро и гелио-энергетических станций, осуществление различных тепловых процессов и др.);
- использование материальных ресурсов для получения энергии (работа энергетических установок, основанных на сжигании углеводородного сырья, отопление зданий и сооружений с использованием различных видов топлив);
- преобразование энергетических ресурсов в материальную субстанцию (использование фотосинтеза в выращивании растениеводческой продукции, производство биотоплив);
- преобразование материальных ресурсов одного вида в другой (переработка сельскохозяйственной продукции, подготовка семян и др.);
- аккумуляирование энергетических и материальных ресурсов для последующего использования (складирование сырья, накопление электрической, тепловой и других видов энергии).

Все вышеназванные процессы неминуемо сопровождаются частичным нецелевыми преобразованиями, обусловленными потерей энергии и материи на трение, рассеянием в окружающую среду, преобразованием в иные формы. В то же время известно, что многие энергетические и материальные ресурсы подлежат постепенному восстановлению (природной релаксации). Например, восстановление дебета нефтяных скважин, восстановление температуры грунта при изъятии из него тепловой энергии, восстановление почвы и растений, восстановление популяции рыб и т.д. При этом весьма важно принимать во внимание, что все эти процессы являются инерционными. Инерционность ха-

рактерна как для использования ресурсов, так и для их релаксации [200]. Дополнительная сложность при анализе этих процессов заключается в значительных различиях в их длительности. Например, восстановление температуры грунта при прекращении извлечения тепловой энергии происходит за несколько часов, восстановление растительной биомассы – от нескольких месяцев до нескольких лет, восстановление дебета нефтяных скважин – за десятки лет. Из этого следует, что изучение процесса расходования и возобновления материальных и энергетических ресурсов не должно ограничиваться уравнением баланса в статических условиях. Обоснованный выбор эффективных ресурсо-энергосберегающих мер может быть осуществлен только с учетом интенсивности процессов и их продолжительности. Наиболее удобным способом обобщения динамики взаимного обращения ресурсов по отмеченным направлениям является анализ их математической интерпретации [105].

Для составления обобщающего математического описания динамического баланса материальных и энергетических ресурсов ограничим многообразие известных преобразований следующими положениями:

- рассматриваемое взаимное преобразование материальных и энергетических ресурсов не имеет отношения к известному принципу эквивалентности массы и энергии Эйнштейна, являющегося основой современной атомной физики, и согласно которому полное количество энергии, содержащейся в некотором количестве вещества, равно произведению массы этого вещества на квадрат скорости света; в отличие от области использования принципа эквивалентности рассматриваемые процессы протекают с несоизмеримо меньшими скоростями;

- количество энергии, искусственно высвобождаемой для последующего использования, может быть обусловлено кинетической составляющей при перемещении тела массой m в пространстве со скоростью v ($E_k = \frac{mv^2}{2}$), потенциальной составляющей при изменении высоты h расположения тела относительно условного уровня и наличии ускорения свободного падения g

($E_{\Pi} = mgh$), тепловой составляющей, определяемой внутренней энергией материального тела при изменении температуры, составляющей от влияния электрического и магнитного полей, составляющей химических, биохимических реакций и пр.

В общем случае уравнения материально-энергетических преобразований имеют вид:

$$E(t) = E_3(t, \eta_1) + E_M(t, \eta_2) + E_{\Pi}(t, \eta_2) \pm E_{\text{акк}}(t, \eta_3),$$

$$M(t) = M_3(t, \eta_4) + M_M(t, \eta_5) + M_{\Pi}(t, \eta_6) \pm M_{\text{акк}}(t, \eta_7),$$

где $E(t)$ и $M(t)$ – затраченные энергетические и материальные ресурсы при осуществлении технологических процессов соответственно; $E_3(t, \eta_1)$ – энергия, расходуемая на преобразование в энергию иного вида; $E_M(t, \eta_2)$ – энергия, затрачиваемая на производство материальной продукции; $E_{\Pi}(t, \eta_2)$ – потери энергии (нецелевые энергетические преобразования); $M_3(t, \eta_4)$ – затраты сырья на получение энергии; $M_M(t, \eta_5)$ – затраты сырья на производство продукции; $M_{\Pi}(t, \eta_6)$ – сырьевые потери; $E_{\text{акк}}(t, \eta_3)$ и $M_{\text{акк}}(t, \eta_7)$ – энергетические и материальные ресурсы, запасаемые в накопителях; t – время; $\eta_1 \dots \eta_7$ – коэффициенты, характеризующие эффективность преобразований.

В зависимости от постановки задачи динамику изменения материальных и энергетических ресурсов предложено представить тремя совокупностями:

$$\left[\begin{array}{l} E(t) = (k_1 \frac{d\varphi_1}{dt} + k_2 \frac{dx_1}{dt} + k_3 \frac{dz_1}{dt})k_5 \cdot \xi + k_4 \\ M(t) = (k_1 \frac{d\varphi_2}{dt} + k_2 \frac{dx_2}{dt} + k_3 \frac{dz_2}{dt})k_7 \cdot \xi + k_6 \end{array} \right. \quad (2.1)$$

$$\left[\begin{array}{l} E(t, \xi) = \int (k_1 \frac{d\varphi_1}{dt} + k_2 \frac{dx_1}{dt} + k_3 \frac{dz_1}{dt})k_5 \cdot d\xi + k_4 \\ M(t, \xi) = \int (k_1 \frac{d\varphi_2}{dt} + k_2 \frac{dx_2}{dt} + k_3 \frac{dz_2}{dt})k_7 \cdot d\xi + k_6 \end{array} \right. \quad (2.2)$$

$$\left[\begin{array}{l} E(t, \xi) = \int (k_1 \frac{d\varphi_1}{dt} + k_2 \frac{dx_1}{dt} + k_3 \frac{dz_1}{dt})k_5 \cdot d\xi^{\tau} + k_4 \\ M(t, \xi) = \int (k_1 \frac{d\varphi_2}{dt} + k_2 \frac{dx_2}{dt} + k_3 \frac{dz_2}{dt})k_7 \cdot d\xi^{\tau} + k_6 \end{array} \right. \quad (2.3)$$

Правая сторона первого уравнения совокупности (2.1) отражает сумму использованной энергии и энергетических «потерь».

Плотность потока энергии определяется произведением скорости распространения энергии и плотностью среды. Это утверждение справедливо для всех видов энергии, в том числе для электромагнитной, механической и тепловой. Обозначив величину перемещения заряда символом φ , перемещения тела в пространстве – символом x , смещение молекулы в материальном теле при его нагреве – символом z , запишем для их скоростей: $\frac{d\varphi}{dt}$, $\frac{dx}{dt}$ и $\frac{dz}{dt}$. Плотность среды может быть охарактеризована массой единицы ее материальной сущности в единице объема: коэффициентами k_1 , k_2 , и k_3 соответственно. Тогда сумма плотностей энергии для всех ее форм может быть представлена в виде:

$$G = k_1 \frac{d\varphi}{dt} + k_2 \frac{dx}{dt} + k_3 \frac{dz}{dt}$$

Переход энергии из одного вида в другой сопровождается уменьшением одного из трех слагаемых и увеличением другого. При этом одновременному изменению могут подвергаться несколько слагаемых. В соответствии с законом сохранения энергии общая сумма остается постоянной, однако энергетические преобразования при КПД=1 в природе не происходят. Часть энергии всегда будет преобразовываться в иные формы и с точки зрения потребителя восприниматься в виде потерь. В наших рассуждениях это количество энергии обозначается символом k_4 .

Преобразование энергии из одного вида в другой может сопровождаться изменением участвующих в преобразовании материальных объектов. Наиболее удобной мерой оценки количества преобразованного вещества является масса. Поскольку эта масса в процессе преобразования будет меняться, для ее обозначения воспользуемся понятием массового коэффициента ξ .

Эффективность взаимодействия энергии с материальными объектами зависит от частных условий: от физической природы и агрегатного состояния этих объектов, их расположения в пространстве и ряда других факторов. Количест-

венной характеристикой такого взаимодействия является коэффициент деформации среды k_5 .

В левой части первого уравнения совокупности (2.1) находится величина преобразованной энергии $E(t)$. При анализе любого технологического процесса, сопровождающегося энергетическими или материально-энергетическими преобразованиями, можно обратиться к записанному уравнению и в зависимости от конечной цели проанализировать влияние на интересующую нас функцию остальных аргументов. При этом легко выявляются аргументы, оказывающие наиболее существенное влияние на функцию, и определяются возможные направления изменения этих аргументов для достижения желаемого результата. При более детальном исследовании процессов, на основе известных физических закономерностей, можно с известной точностью произвести их количественную оценку, а также учесть динамические свойства.

Рассмотрим единицы измерения величин, входящих в сформированное уравнение:

1. Независимо от физической природы носителя энергии перемещение объекта определяется мерой длины $[м]$.
2. Скорость перемещения (например, $\frac{dx_1}{dt}$) характеризуется расстоянием, преодолеваемым объектом за единицу времени, $[м/с]$.
3. Плотность среды определяется массой единицы объема $[кг/м^3]$.
4. Массовый коэффициент (мгновенная масса), $[кг]$.
5. Коэффициент деформации среды (произведение упругости и скорости деформации среды $\frac{м^3}{кг} \cdot \frac{м}{с}$): $[\frac{м^4}{кг \cdot с^2}]$.

В результате подстановки получим:

$$\frac{м \cdot кг \cdot м^4 \cdot кг}{с \cdot м^3 \cdot кг \cdot с^2} = \frac{кг \cdot м^2}{с^2} = Дж$$

При необходимости использования совокупности для анализа изменения массы материального объекта аналогичным образом следует обратиться ко

второму уравнению совокупности (2.1). В этом случае коэффициент k_6 характеризует нерационально потраченную массу, а коэффициент k_7 – деформацию (изменение) массы.

Совокупность (2.1) иллюстрирует динамику приобретения энергии (материального ресурса) или ее (его) отдачу материальному объекту (преобразования в энергию). Эта зависимость позволяет оценить продолжительность энергетических (материальных) преобразований в результате осуществления электромагнитных, механических или тепловых процессов. Совокупность (2.2) характеризует зависимость выделяемой или поглощаемой энергии (потраченного или приобретенного материального ресурса) от участвующей в процессе преобразования массы (энергии) материальных объектов (энергетическим ресурсом) во времени. Это выражение представляет собой сложную функцию от двух независимых переменных, которыми являются массовый коэффициент и длительность процесса. ($\xi = \sum_{i=1}^{i=3} k \cdot m_i$); k – количество, участвующих в процессе материальных объектов; m_i – масса материального объекта; i – номер материального объекта, соответствующий номеру коэффициента, учитывающий состояние среды; τ – длительность восстановления ресурса.

Аналогично энергии масса также может переходить из одного состояния в другое в зависимости от агрегатного состояния тела и прочих факторов. При этом время может рассматриваться как параметрическая величина, допускающая варьирование. В зависимости от статуса этой величины показатель интегрирования ξ^τ проявляет либо свойства степенной функции, описывающей акакумулирующий эффект, либо свойства показательной функции, характеризующей природную релаксацию, как показано в совокупности (2.3).

Поскольку интерес участников производственных процессов сводится к повышению эффективности материальных и энергетических преобразований, их высокой скорости, минимальным затратам медленно релаксирующих природных ресурсов или обеспечению условий для их ускоренного восстановления, последующие исследования должны быть направлены на поиск оптимальных соотно-

шений коэффициентов k_1, \dots, k_7 , а затем на разработку способов и технических средств для их количественной реализации.

Принимая во внимание закон сохранения энергии (массы), можно сказать, что совокупности иллюстрируют переход энергии и массы из одной формы в другую. Например, переход потенциальной энергии в кинетическую, кинетической – в тепловую, тепловой – снова в потенциальную. При $k_1 = 0$ рассматриваемые совокупности отражают исключительно механические и тепловые процессы, при протекании которых происходит выделение кванта энергии. Равенство $k_1 = 0$ может свидетельствовать о переходе электрической энергии в механическую или тепловую форму. При этом величина k_2 возрастет. Равенство нулю любого коэффициента свидетельствует о переходе энергии из одного вида в другой. При полной трансформации энергии (коэффициенты равны нулю) либо при ее частичной трансформации (один или несколько коэффициентов стремятся к нулю) ненулевой коэффициент в соответствии с законом сохранения энергии увеличивается. Рассматриваемая зависимость может быть периодической и описываться аналитической функцией, или иметь дискретный характер относительно скорости протекания процесса или объекта наблюдения.

При анализе совокупностей (2.1), (2.2) и (2.3) следует принимать во внимание ограничение о недопустимости равенства нулю коэффициентов k_4 и k_6 . Поскольку в процессе полной или частичной трансформации энергии ее потери происходят естественным путем, эти коэффициенты могут достигать своего максимального значения только в том случае, когда два других коэффициента стремятся к нулю. Следовательно, для минимизации потерь необходимо плавное стремление обоих коэффициентов к нулю или создание условий достижения максимума двумя другими коэффициентами при равенстве нулю оставшегося коэффициента. Аналогичные рассуждения справедливы для других коэффициентов совокупностей. При этом поиск направлений исследований будет касаться различных форм энергии, различных видов материальных субстанций и различных видов их взаимных преобразований [108, 120].

Например, в системах конвективного отопления, при обращении выработанной тепловой энергии, большое значение имеет рациональный режим ее использования. Этот режим характеризуется наиболее эффективным сочетанием температуры теплоносителя и рабочей поверхности теплообменных аппаратов. При использовании теплоты грунта для обеспечения работоспособности испарительного контура тепловых насосов необходимо обеспечить возможность ускоренного восстановления температуры грунта под воздействием геотермального ресурса. В отопительных системах с использованием водогрейных газовых котлов необходимо создавать условия для наиболее рационального сжигания топлива с целью его экономии и снижении отрицательного воздействия на окружающую среду. В системах водоснабжения и орошения особое значение имеют меры снижения потерь водных ресурсов и связанных с ними потери энергетических ресурсов на извлечение, подготовку и транспортировку воды. При использовании энергии сверхвысокочастотного электромагнитного поля для обработки сельскохозяйственных материалов необходима разработка мер, обеспечивающих минимизацию потерь этих материалов вследствие неравномерности воздействия. Кроме того, для успешной эксплуатации микроволновых генераторов необходимо разработать ресурсосберегающие меры по исключению их выхода из строя при аварийных режимах. Процесс преобразования кинетической энергии ветра в механическую форму требует разработки способов снижения пространственного ресурса, занимаемого ветроэнергетическими установками, а также повышения эффективности выработки энергии за счет расширенного использования низкоэнергетического ветрового потенциала. В связи с развитием автономных и комбинированных систем энергообеспечения объектов АПК [100, 225, 226] большое значение приобретают ресурсо-энергосберегающие способы аккумуляции преобразованной энергии. Для обеспечения условий качественного хранения сельскохозяйственной продукции необходима разработка энергосберегающего способа осушения воздуха. Помимо этого в совершенствовании нуждаются процессы утилизации тепловой и кинетической энергии теплоносителя в авто-

номных отопительных системах [150], ресурсосберегающие технологии предпосевной обработки семян, а также ресурсосберегающие технические решения при производстве электронного оборудования и энергосберегающие способы беспроводной связи компонентов телеметрических систем.

Рассмотрим методологию использования совокупностей (2.1), (2.2) и (2.3) для некоторых технологических процессов АПК с целью выявления направлений создания новых способов эффективного использования энергетических и материальных ресурсов.

Воздействие энергии сверхвысокочастотного электромагнитного поля на сельскохозяйственные материалы происходит при участии следующих составляющих второго равенства совокупности (2.1): $M(t)$; $k_1 \frac{d\varphi}{dt}$, $k_3 \frac{dz}{dt}$ и $k_5 \xi + k_4$. Конечным результатом СВЧ-обработки являются материальные объекты, обладающие новыми качественными свойствами: семена, зерно, коконы шелкопряда, продукция растениеводства, птицеводства и т.д. Масса этих объектов является функцией времени и обозначается символом $M(t)$. В качестве побудителя электромагнитного поля выступает микроволновый генератор, принцип действия которого основан на возникновении электромагнитных колебаний при взаимодействии потока электронов с электрической составляющей сверхвысокочастотного поля в пространстве, где постоянное магнитное поле и постоянное электрическое поле взаимно-перпендикулярны. Основанием для возникновения первичного переменного тока является изменение величины заряда, проявляющееся при его движении $\frac{d\varphi}{dt}$. Распространение пучка СВЧ-энергии зависит от состояния проводящей среды и от геометрических параметров волновода. Во втором уравнении первой совокупности это состояние характеризуется коэффициентом k_1 . Учет характера взаимодействия СВЧ-энергии с веществом характеризуется диэлектрической проницаемостью и тангенсом угла потерь обрабатываемого материала, а также его формой и размерами. Во втором уравнении совокупности (2.1) эффективность взаимодействия СВЧ-энергии с материалом определяется коэффициентом k_5 . В за-

висимости от решаемой задачи исследуемое уравнение трансформируется в три разные формы.

1. Ввиду невозможности достижения идеально точного дозирования СВЧ-воздействия на все точки обрабатываемого материала, возникает задача определения количества (массы или объема) материала, при котором отклонение дозы воздействия не превысит допустимую величину $D_{\text{доп.}}$. Для этого необходимо обеспечить условия, при которых k_6 окажется минимальным ($k_{6\text{доп.}} \rightarrow 0$). Достижение обозначенного условия позволит сократить количество материала, обработанного с отклонением от требуемой дозы. Тогда второе уравнение совокупности (2.1) сведется к выражению $M(t) = (k_1 \frac{d\varphi_2}{dt} + k_3 \frac{dz_2}{dt})k_5 \cdot \xi + k_{6\text{доп.}}$ или

$$M = \left[(k_1 \frac{d\varphi_2}{dt} + k_3 \frac{dz_2}{dt})k_5 - D_{\text{доп.}} \right] \xi$$

В ряде случаев тепловая составляющая СВЧ-обработки перемещается на второй план, уступая место специфическому (биологическому) эффекту. В этом случае слагаемое $k_3 \frac{dz}{dt}$ в правой части уравнения будет отсутствовать и выражение для допустимого количества обрабатываемых материалов примет вид:

$$M = \left[k_5 k_1 \frac{d\varphi_2}{dt} - D_{\text{доп.}} \right] \xi$$

2. Поскольку при небольших мощностях СВЧ-генератора имеет место влияние массы обрабатываемого материала на интенсивность СВЧ-воздействия, для повышения точности дозирования этого воздействия необходимо отслеживать массу и корректировать режим работы микроволнового генератора. Для принятых обозначений алгоритм управления будет иметь вид:

$$k_1 \frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{M - k_6}{k_5 \xi}$$

Перестройка режима работы микроволнового генератора при меняющейся массе обрабатываемых продуктов позволит сберечь энергию, а

также уменьшить количество некачественно обработанного материала.

3. При включении микроволнового оборудования в отсутствие нагрузки в рабочей камере наблюдается рассогласование поглощения СВЧ-энергии, приводящее к аварийному режиму с последующим выходом из строя магнетрона. Во избежание аварийного режима следует производить автоматический контроль наличия обрабатываемых материалов в рабочей камере и в случае их отсутствия осуществлять немедленное отключение питания. Формализуя вышеуказанное требование, можно записать:

$$\text{при } M = 0; \frac{d\varphi_2}{dt} = 0$$

Выполнение этого требования обеспечит сбережение материальных ресурсов в форме сохранения магнетронов в рабочем состоянии.

Анализируя первое равенство совокупности (2.1) с позиции преобразования кинетической энергии ветра в механическую форму, можно отметить, что для достижения максимального значения преобразованной энергии следует увеличить сумму слагаемых в правой части первого равенства. При этом слагаемые $k_1 \frac{d\varphi}{dt}$ и $k_3 \frac{dz}{dt}$ обращаются в нуль, поскольку электрическая и тепловая составляющие процесса участия в преобразовании не принимают. В таком случае первое равенство совокупности (2.3) примет вид: $E(t) = k_2 \frac{dx}{dt} \times k_5 \xi + k_4$. Изменение величины сомножителя $\frac{dx}{dt}$ не представляется возможным, так как он отражает производную от перемещения молекул воздуха по времени, то есть скорость ветра. При этом попытку искусственного увеличения этой величины посредством диффузора следует признать нецелесообразной из-за увеличения габаритов преобразователя, увеличения знаменателя выражения (2.4) и уменьшения приведенного коэффициента эффективности преобразований.

Сомножитель k_5 подлежит увеличению за счет улучшения условий взаимодействия молекул воздуха с элементами ветроколеса. Сюда будут относиться-

ся геометрические размеры лопасти, ее форма, шероховатость поверхности и ряд других показателей.

Объем участвующего во взаимодействии с ветроколесом воздуха искусственно не меняется, вследствие чего мы делаем вывод о невозможности увеличения массового коэффициента ξ без изменения стереометрических показателей преобразователя.

Искусственное увеличение коэффициента k_2 , характеризующего плотность среды (в данном случае – плотность воздуха), мы реализовать не в состоянии. В то же время, принимая во внимание зависимость плотности воздуха от его температуры, можно предположить, что при появлении эффективного способа охлаждения воздуха в потоке идея повышения коэффициента k_2 может оказаться актуальной. При этом следует учесть, что попытка воздействия на плотность воздуха изменением его температуры приведет к справедливости неравенства $k_3 \frac{dz_1}{dt} < 0$. Последнее означает появление энергетических потерь при отборе тепловой энергии от движущегося воздуха и ставит под сомнение целесообразность искусственного изменения коэффициента k_2 .

Часть кинетической энергии, преобразованной в механическую форму, неминуемо будет утрачиваться на трение в подшипниках, на преодоление реактивных сопротивлений при движении лопастей, на переориентирование ветродвигателя в пространстве посредством механических виндроз и т.д. Для обозначения этих потерь в уравнении первой совокупности использован символ k_4 . Поскольку рассматриваемые энергетические потери не связаны с остальными членами совокупности, дальнейшие исследования также могут быть направлены на уменьшение составляющей k_4 .

Таким образом, в результате анализа первого равенства совокупности (2.1) можно сделать вывод о возможности повышения эффективности процесса (и потому – сбережению ветрового ресурса) преобразования кинетической энергии ветра в механическую форму увеличением k_5 и уменьшением k_4 . Сбере-

жение пространственного ресурса может быть достигнуто увеличением ξ и связанными с ним стереометрическими характеристиками преобразователя.

Применяя первое уравнение совокупности (2.1) к процессу извлечения тепловой энергии из грунта для последующего ее использования в испарительных контурах тепловых насосов, можно записать:

$$E(t) = k_3 k_5 \cdot \xi \frac{dz_1}{dt} + k_4$$

Коэффициент k_3 теперь характеризует теплопроводные свойства грунта, коэффициент k_5 – условия передачи тепловой энергии от грунта к стенкам теплообменника и от стенок теплообменника к теплоносителю, сомножитель $\frac{dz_1}{dt}$ – скорость изменения температуры теплоносителя и k_4 – потерю тепловой энергии в процессе преобразования и транспортировки. Очевидно, что одинаковый объем энергии можно сообщить теплоносителю при различных сочетаниях разности температур и продолжительности теплообмена. Для осциллирующего режима подключения теплообменников можно записать:

$$E(t) = k_3 k_5 \cdot \xi \sum_{j=1}^r \frac{dz_j}{dt} + k_4 ,$$

где z_j – характеристика подвижности молекул в теплообменных средах j -го теплообменника; j – номер теплообменника; r – количество теплообменников.

В то же время осциллирующий режим является предпочтительным, поскольку он предусматривает осуществление теплообмена за короткое время при большей разности температур. Кроме того, в осциллирующем режиме должны выполняться условия: $z_j > z$ и $\Delta t < T$, где Δt – продолжительность подключения j -го грунтового теплообменника и T – продолжительность подключения теплообменника в обычном режиме.

Из первого уравнения совокупности (2.3) можно определить длительность τ восстановления тепловой энергии грунта до заданного значения. При этом подинтегральное выражение следует рассматривать как показательную функцию, а сам процесс восстановления охарактеризовать природной релаксацией.

Для описания процесса горения газа в маломощных водогрейных котлах с применением в качестве окислителя озono-воздушной смеси может быть использовано первое уравнение совокупности (2.1). При этом $k_2 \frac{dx_1}{dt} = 0$. Под действием электрической энергии, определяемой слагаемым $k_1 \frac{d\varphi_1}{dt}$, происходит образование озона. В этом случае коэффициент k_1 характеризует геометрические размеры и форму электродов, а коэффициент k_3 – интенсивность молекулярного движения в соответствии с законом Аррениуса, а коэффициент k_5 – скорость окислительного процесса. Из анализа уравнения следует, что увеличение скорости горения целесообразно увеличивать значения k_3 и k_5 , что позволит за то же время преобразовать большее количество тепловой энергии.

Способ сбережение водного ресурса просматривается по второму уравнению совокупности (2.1), которое для этого случая запишется в виде:

$M(t) = k_1 \frac{d\varphi_2}{dt} k_5 \cdot \xi + k_6$. В этом уравнении слагаемое $k_1 \frac{d\varphi_2}{dt}$ характеризует затраты электрической или иной энергии на работу насоса, коэффициент k_5 – расходы энергии на подачу воды и коэффициент k_6 – потери воды. Следовательно, сбережение водного ресурса может быть достигнуто оперативным определением величины k_6 и принятием мер для сведения ее к нулю:

$$k_6 = M(t) - k_1 \frac{d\varphi_2}{dt} k_5 \cdot \xi.$$

Подготовка семян к посеву посредством их дражирования иллюстрируется вторым уравнением первой совокупности, в левой части которого находится масса кондиционных драже. Для рассматриваемого случая слагаемое $k_3 \frac{dz_2}{dt} = 0$. Общие затраты электроэнергии на работу дражировщика, определяются слагаемым $k_1 k_5 \cdot \xi \frac{d\varphi_2}{dt}$, где k_1 – коэффициент, определяющий эффективность электродвигателей и трансмиссий, коэффициент k_5 – эффективность энергозатрат на обеспечение работоспособности системы автоматизации, а также системы впрыска жидкости и исходных материалов для образования оболочки. ξ – массовый коэффициент, показывающий долю смесей и семян, не уча-

ствующих в процессе образования драже; k_6 – количество бракованных драже. Очевидно, что для сбережения семенного материала, как важного вида биологического сырьевого ресурса, необходимо создавать условия для повышения коэффициента k_3 и уменьшения коэффициента k_6 .

Энергетический баланс при использовании инерционных накопителей описывается первым уравнением совокупности (2.1). Этот случай предусматривает равенство нулю слагаемого $k_3 \frac{dz_1}{dt}$. Слагаемое $k_1 \frac{d\varphi_1}{dt}$ показывает обращение электрической энергии в электродвигателе и электрогенераторе, а слагаемое $k_2 \frac{dx}{dt}$ – накопление и отдачу кинетической энергии маховиком. Для достижения сбережения энергетического ресурса следует увеличивать эффективность накопителя посредством снижения трения вала в подшипниках, маховика о воздух (k_4), а также улучшать качество изготовления маховика для увеличения частоты вращения $\left(\frac{dx}{dt}\right)$. Графическая иллюстрация прикладной интерпретации математических совокупностей при поиске направлений создания новых способов энерго-ресурсосбережения представлена на рисунке 2.1.

Признавая правомерность вектора Умова, сделан вывод, что для решения практических задач он является неудобным, поскольку при этом приходится анализировать среду распространения энергии, принимать во внимание ее деформацию и определять скорость распространения энергии. Кроме того, теоретический подход весьма сложен при оценке взаимного влияния разнотипных энергетических источников с изменяющимися характеристиками во времени с учетом их возобновляемости, экологической безопасности и других важных требований.

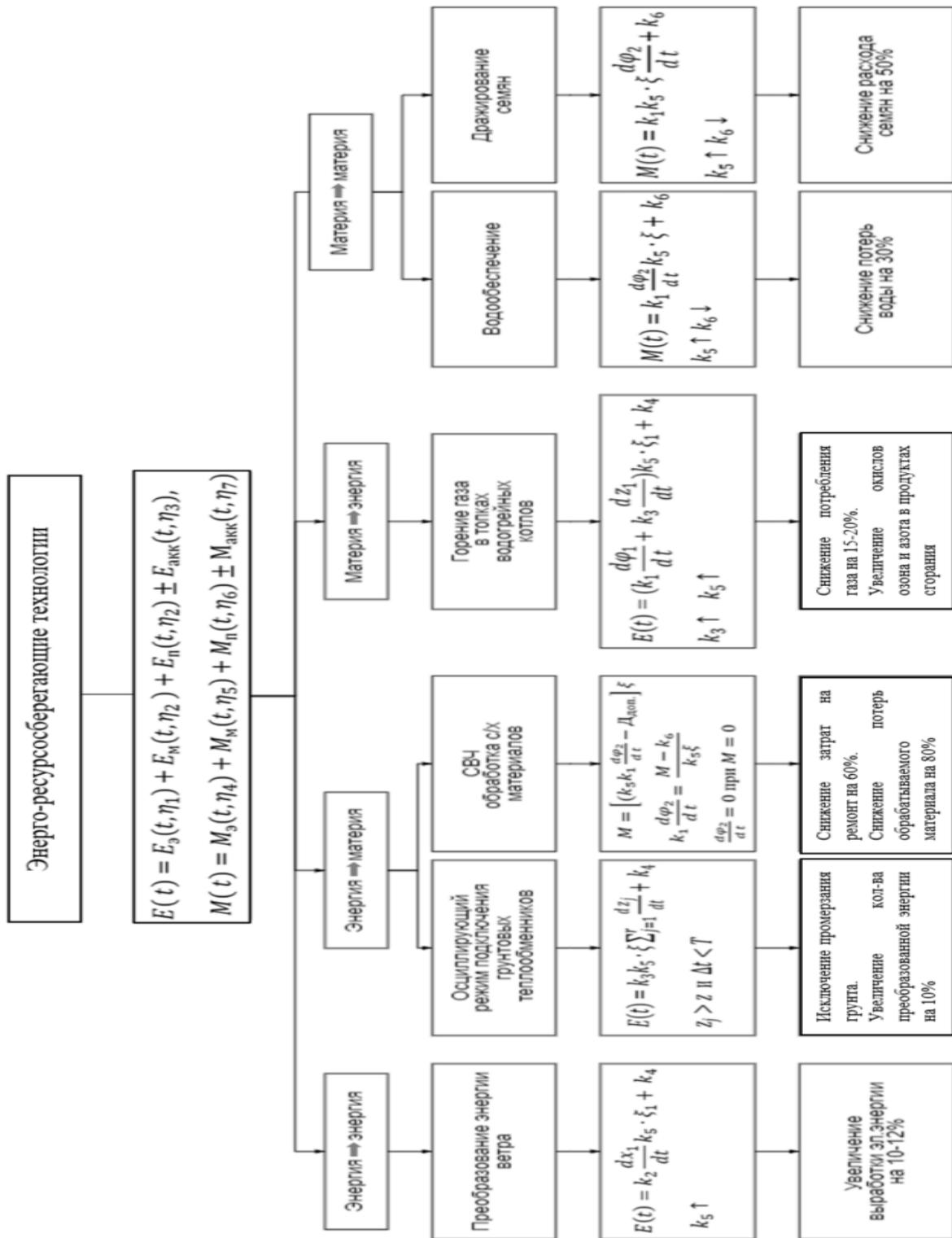


Рисунок 2.1.– Прикладная интерпретация методологии обоснования направлений повышения эффективности разнотипных материально-энергетических преобразований

Поэтому в качестве альтернативного приема оценки эффективности материальных и энергетических преобразований предложен более простой способ, основанный на анализе приведенного коэффициента. Оценка КПД процесса обычно сводится к определению отношения преобразованной и преобразуемой энергий. Однако ввиду возрастающей ценности среды нашего обитания, роста энергопотребления, повышения требований к качеству жизни, а также взаимного влияния преобразователей расчет их эффективности предложено дополнить учетом рабочего пространства, занимаемого преобразователем в совокупности с пространством, в котором расположение других аналогичных преобразователей невозможно [154, 4]. Например, при преобразовании кинетической энергии ветра расстояние между соседними ветроэнергетическими установками должно быть не меньшим шести диаметрам ветроколес (см. рисунок 2.2а). Поэтому при эксплуатации 12 ветроэнергетических установок мощностью по 15 кВт, размещенных на местности со средней скоростью ветра 5 м/с, требуемая площадь земли составит 26,5 га. Эту территорию уже невозможно использовать для других хозяйственных целей. При учете габаритов и высоты расположения ветроэнергетических установок отчуждаемая площадь заменяется отчуждаемым объемом. Таким образом, приведенный коэффициент эффективности преобразований может быть рассчитан как

$$K = \frac{E_M}{E_B} \times \frac{1}{V_{уст} + \Delta V}, \quad (2.4)$$

где E_M – энергия, преобразованная в механическую форму, Дж; E_B – кинетическая энергия ветра, ометаемая лопастями, Дж; $V_{уст}$ – объем, занимаемый ветроэнергетической установкой, м³; ΔV – объем пространства в окрестности ветроэнергетической установки, в котором размещение других технических невозможно, м³ [201].

Аналогично учет рабочего пространства необходим для гелиоэнергетической системы с двумя плоскими фотоэлектрическими преобразователями, которые расположены друг над другом, в виде этажерки (см. рисунок 2.1 б). В этой системе верхний фотоэлектрический преобразователь находится под воз-

действием солнечного излучения, но при этом препятствует нормальной работе нижнего. Таким образом, объем рабочего пространства преобразователя, в рассматриваемой конструкции, существенно увеличивается. В расчетах традиционное значение коэффициента полезного действия преобразователя при оценке эффективности источника следует поделить на сумму $V_{уст} + \Delta V$ [152]. При определении расстояния между нижним и верхним фотоэлектрическими элементами принято во внимание, что оно зависит от площадей преобразователей. Без учета рассеянного света с ростом площади преобразователей искомое расстояние уменьшается. Это расстояние будет также зависеть от степени удаления источника, а также от угла между источником и плоскостью расположения преобразователей. Тогда для случая равных площадей фотоэлектрических преобразователей можно записать:

$$H = A \times \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.2)$$

где H – расстояние между фотоэлектрическими преобразователями; A – длина фронтальных сторон прямоугольных фотоэлектрических преобразователей; α – угол между источником оптического излучения и плоскостью фотоэлектрического преобразователя.

Для геотермальных преобразователей или преобразователей низкопотенциальной теплоты грунта с использованием тепловых насосов типов «грунт–вода» или «грунт–воздух» рабочее пространство включает в себя объем теплового насоса, объем труб, объем V грунта, занимаемого теплообменником (рисунки 2.2.в).

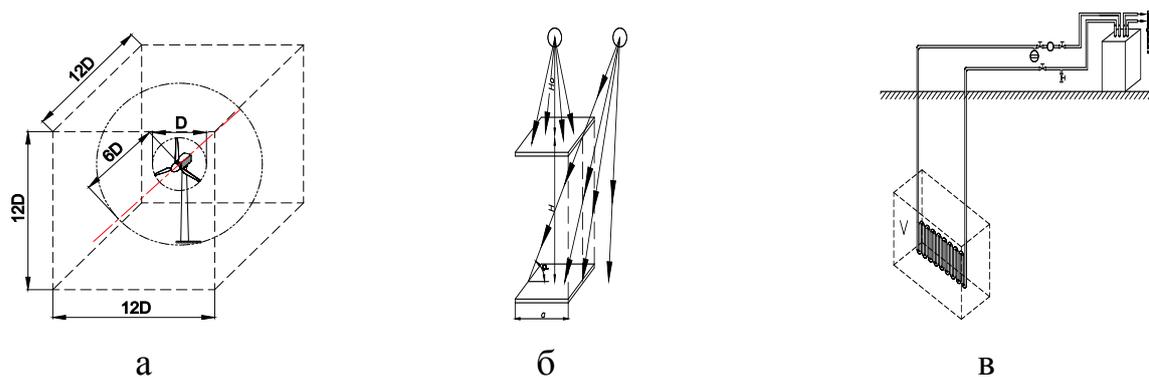


Рисунок 2.2. – К определению рабочего пространства ветроэнергетической (а), фотоэлектрической (б) и теплонасосной установок с грунтовым теплообменником (в).

В более точных расчетах выражение (2.4) не является окончательным, поскольку его целесообразно корректировать в соответствии с экономическими, экологическими и социальными факторами. Кроме того, чрезмерно интенсивная эксплуатация некоторых энергетических источников может вызвать их истощение. В связи с этим необходимо принимать во внимание соотношение интенсивностей искусственного изъятия и природного возобновления энергии.

Введение в практику проектных расчетов категории рабочего пространства будет побуждать к разработке компактных преобразователей энергии. Например, ветродвигателей, не требующих ориентации по направлению ветра или компактных фотоэлектрических преобразователей, оснащенных устройствами утилизации тепловой энергии.

Выводы по главе 2

1. На основе закона сохранения и взаимного обращения массы и энергии, а также исходя из зависимости интенсивности материально-энергетических преобразований от векторного произведения плотности потока энергии или материальных субстанций и скорости их распространения в упругой среде, разработана методология обоснования направлений исследований для обеспечения энерго-ресурсосбережения в технологических процессах АПК. Сформированы совокупности уравнений для математической формализации

материально-энергетических преобразований и определения физических процессов и величин, используемых в способах сбережения материальных и энергетических ресурсов.

2. Для сравнительной оценки эффективности разнородных преобразователей материальных и энергетических ресурсов наряду с понятием коэффициента полезного действия следует учитывать величину рабочего пространства, занимаемого преобразователем в совокупности с пространством, в котором расположено других аналогичных преобразователей невозможно.
3. Для принятия сформулированной концепции необходимо получение положительных результатов ее использования при создании способов энерго-ресурсосбережения в нескольких разнотипных технологических процессах, которые рассматриваются в последующих главах.

Глава 3. Электротехнологические способы и технические средства энерго-ресурсосбережения в системах тепло-водообеспечения объектов АПК

3.1 Совершенствование методики расчета энергосберегающих низкотемпературных децентрализованных систем отопления

3.1.1 Постановка задачи оптимизации конструкций децентрализованных отопительных систем

Для разработки способа оптимизации конструкций децентрализованных отопительных систем следует обратиться к первому уравнению совокупности (2,1) и положению об эффективности использования пространства, формализованное выражением (2.4). В правой части уравнения слагаемые, характеризующие электромагнитную и механическую составляющие материально-энергетического баланса будут отсутствовать: $k_1 \frac{d\varphi}{dt} = k_2 \frac{dx}{dt} = 0$. В таком случае полезно преобразуемая тепловая энергия $E(t)$ будет характеризоваться разностью поступившей энергии $k_3 \frac{dz_2}{dt} k_5 \cdot \xi_2$ и нецелевыми потерями k_4 . Однако создание условий для увеличения $k_3 \frac{dz_2}{dt} k_5 \cdot \xi_2$ связано с изменением рабочего пространства преобразователей $V_{уст} + \Delta V$ в соответствии с выражением (2.4). Ввиду наличия конструктивных, санитарно-технических и экономических соображений последние величины взаимосвязаны между собой и для определения их наиболее эффективного соотношения необходимо решить оптимизационную задачу. Пример такого решения приведен в нижеприведенных рассуждениях.

Несмотря на наличие многочисленных способов обогрева помещений, на сегодняшний день наиболее распространенными остаются системы конвективного отопления с жидким теплоносителем. Эти системы хорошо зарекомендовали себя при малоэтажном строительстве в сельской местности. Принцип действия систем не менялся в последние 180 лет, однако в последнее время при их проектировании начинают ощущаться некоторые новые тенденции [297].

Во-первых, в проектах отопительных систем развитых стран все большее место занимают системы с относительно низкой температурой теплоносителя. Во-вторых, в связи со стремительным развитием промышленной электроники и техники связи возрастающее значение приобретают системы локального управления расходом теплоносителя по принципу «умный дом», В-третьих, начинают применяться управляемые разнотемпературные комбинированные системы отопления, предусматривающие автоматическое поддержание различной температуры в теплообменных аппаратах, установленных в разных местах обогреваемого помещения. В-четвертых, весьма перспективными представляются разработки отопительных систем с использованием новых видов жидких теплоносителей, тепловых труб и нанотехнологий.

Среди перечисленных тенденций наиболее интересен переход на низкотемпературные режимы. Если традиционные системы отопления предусматривают подачу теплоносителя в отопительные приборы с температурой 70...80°C, а температура теплоносителя в обратном контуре при этом составляет 50...60°C, то в низкотемпературных системах эти значения будут 50°C и 35°C и даже ниже. Следует отметить, что еще в 80-х годах XX столетия в нашей стране нормы температур в прямом и обратном контуре были снижены до соотношения 75/65°C.

Основные преимущества низкотемпературных систем отопления заключаются в снижении потерь теплоты при транспортировке теплоносителя из-за меньшей разности температур внутри и снаружи трубопровода; исключения необходимости использования дорогостоящей теплоизоляции; снижения риска получения ожогов в аварийных ситуациях, связанных с повреждением трубопроводов, исключения получения ожога при прикосновении к трубам или теплообменным аппаратам, повышения температурного комфорта в отапливаемых помещениях ввиду равномерности распределения температуры (отсутствия локализации высокотемпературных зон в местах установки отопительных приборов), исключения чрезмерного перегрева и последующего снижения качественных показателей предметов, расположенных вблизи от ото-

пительных приборов (измерительной аппаратуры, электронных устройств, мебели и т.д.); значительного снижения вероятности появления запахов от предметов, контактирующих с отопительными приборами, снижения количества частиц пыли, поднимаемых восходящими потоками воздуха в местах расположения отопительных приборов, значительного расширения возможности использования возобновляемых источников энергии (солнечных коллекторов, тепловых насосов и т.д.), возможности получения дополнительной экономии энергоносителей и сокращения объема вредных выбросов в атмосферу за счет использования конденсационных котлов; возможности реализации низкотемпературной системы отопления в конструкциях с обогреваемыми полами.

В качестве недостатка низкотемпературных систем можно назвать повышенные требования к отопительным приборам, которые должны иметь большую поверхность.

Традиционный подход к обоснованию параметров конвективной системы отопления сводится к определению площади поверхности теплообменных аппаратов на основе информации о температуре теплоносителя, требуемой температуре воздуха в помещении, а также о величине и характере тепловых потерь. Далее следует выбор конструкции и определение количества теплообменных аппаратов, а также выбор места их расположения в отапливаемом помещении.

При традиционном подходе поверхность теплообменных аппаратов является функцией, а температура теплоносителя остается аргументом [141]. Иной подход будет бессмысленным, так как температура теплоносителя определяется режимом работы котельной и при централизованном теплоснабжении должна восприниматься такой, какой она есть. Температура теплоносителя на входе в объект зависит от его удаленности от котельной, потерь теплоты на трассе и ряда других неуправляемых факторов. Правда, при индивидуальном теплоснабжении с использованием водогрейных котлов (в коттеджах и небольших производственных помещениях) выбор температуры теплоносителя остается за потребителем. Более того, изменяя температуру теплоносителя, он

получает возможность легкого реализуемого варьирования температурой в помещении. Однако в этом случае можно говорить только об оперативном управлении, осуществляемом в окрестности каких-то установленных значений. При этом экономические аспекты отопления не учитываются. Обычно при проектировании отопления в качестве теплообменников используют либо трубы фиксированного диаметра (как, например, в теплицах), либо промышленные радиаторы (как в административных и жилых помещениях). Вместе с тем современные конструкционные материалы позволяют по-новому взглянуть на этот вопрос и вернуться к проектированию теплообменников для конкретных объектов, используя их в качестве элементов строительных конструкций. Такой подход оказывается вполне оправданным вследствие дешевизны ряда полимерных материалов, их чрезвычайно высокой механической и термической прочности, легкости монтажа, хороших теплопроводящих свойств и гладких поверхностей, создающих незначительное сопротивление движению теплоносителя.

С физической точки зрения одного и того же результата можно достичь различными способами. Например, прокладкой трубопровода с высокотемпературным жидким теплоносителем (рисунок 3а приложения В) по периметру отапливаемого помещения. При увеличении поверхности такого теплообменника (например, добавив радиаторы), температуру теплоносителя можно снизить (рисунок 3б приложения В). Еще большего снижения температуры теплоносителя можно достичь при заполнении им полостей внутри перегородок помещения (рисунок 3в приложения В) [121].

Количество теплоты на отопление объекта обычно определяется из уравнения теплового баланса:

$$Q_{от} = Q_{см} + Q_n + Q_в - Q_m + Q_{np}, \quad (3.1)$$

где $Q_{см}$ — теплотери наружными стенами, Вт; Q_n — теплотери покрытием, Вт; $Q_в$ — расход теплоты на вентиляцию, Вт; Q_m — тепловыделение насыпью продукции, Вт; Q_{np} — расход теплоты на нагрев воздуха, выходящего из внутренней прослойки в верхнюю зону, Вт.

В качестве примера в соответствии с выражением (3.1) были рассчитаны площади теплообменных аппаратов, требуемые для обеспечения одинаковой температуры воздуха в производственном помещении с известными теплотехническими параметрами при температурах теплоносителя 50°, 60° и 70°С [210]. При этом за начальные условия расчета были приняты: расчетная температура наружного воздуха – 32°С, внутреннего +2°С, стеновая панель – кирпич пустотелый строительный плотностью 1100 кг/м³, водопоглощение – 6...8%, покрытие из железобетонных плит плотностью 2300 кг/м³, толщиной 65 мм, площадь поверхности наружных стен – 417 м², покрытия – 1162 м², сопротивление теплопередачи – 2,6 м²град/Вт. В результате расчетов было установлено, при увеличении температуры теплоносителя на 20°С поверхность теплообменных аппаратов может быть уменьшена почти в 6 раз [210].

Итак, для достижения эффективности конвективной системы отопления площадь теплообменных аппаратов можно рассматривать как функцию нескольких переменных:

$$F = f_1(T_{тн}; q_{тн}; T_{вн}; Q_{пот.}; K_{ос.}; B_{мат.}) \quad (3.2)$$

где $T_{тн}$ – температура теплоносителя; $T_{вн}$ – требуемая температура воздуха в помещении; $Q_{пот.}$ – суммарные тепловые потери; $K_{ос.}$ – коэффициент, учитывающий особенности распространения теплоты от конвективной системы отопления данного типа; $B_{мат.}$ – коэффициент, учитывающий теплопроводные свойства материала теплообменного аппарата.

С другой стороны, температура теплоносителя может быть представлена следующим образом:

$$T_{тн} = f_2(F; q_{тн}; T_{вн}; Q_{пот.}; K_{ос.}; B_{мат.}) \quad (3.3)$$

Аргументами функций (3.2) и (3.3) являются одни и те же параметры, кроме явно взаимозависимых величин F и $T_{тн}$. Вместе с тем f_1 и f_2 являются совершенно различными функциями и по отношению к каждому индивидуальному аргументу, и по отношению к их совокупности. Поэтому для получения функционала выражений (3.2) и (3.3) потребуется детальное исследование отапливаемых объектов и последующее определение условий оптимизации.

3.1.2 Определения функциональной взаимосвязи температуры теплоносителя и рабочей поверхности теплообменных аппаратов

Для определения функциональной связи температуры теплоносителя $T_{тн}$ и рабочей поверхности теплообменных аппаратов F был использован взаимно-обратный характер затратных составляющих. Известно, что с увеличением площади теплообменных аппаратов возрастают затраты на их изготовление и монтаж. С другой стороны, при увеличении температуры теплоносителя увеличиваются затраты на затрачиваемую на его нагрев энергию. Эти затраты имеют различный характер: затраты на сооружение теплообменных аппаратов определяются капитальной составляющей, а затраты на нагрев теплоносителя – эксплуатационной. Таким образом, с увеличением поверхности теплообменных аппаратов растут капитальные затраты при одновременном уменьшении эксплуатационных издержек.

Исследование функций f_1 и f_2 произведено посредством минимизации выражения f_3 , учитывающего обе составляющие. Минимизируемая функция f_3 может определяться простой суммой f_1 и f_2 . При разнозначных слагаемых функция f_3 – может характеризоваться суммой их квадратов, при резких всплесках и провалах – интегралом суммы квадратов и т.д. Наиболее простой функцией для нашего случая является арифметическая сумма, которая при приведении к годовому интервалу весьма схожа с экономическим показателем приведенных затрат. Таким образом, процедура оптимизации решения задачи сводится к минимизации приведенных затрат. Если отапливаемое помещение является производственным и температура воздуха каким-то образом сказывается на производительности процесса, то правомерно деление обоих слагаемых на величину произведенной продукции q . В таком случае мы имеем сумму удельных показателей, как того требует экономическая наука:

$f_3 = \frac{f_1}{q} E + \frac{f_2}{q}$, где E – нормативный коэффициент окупаемости капитальных затрат.

Определение условий достижения минимума приведенных затрат позволит найти оптимальное соотношение исследуемых величин. Строго говоря, это соотношение не будет являться постоянным, поскольку ценовые составляющие капитальных и эксплуатационных затрат непрерывно меняются. Следует ожидать, что цены на полимерные материалы, используемые для изготовления теплообменных аппаратов, будут снижаться. Одновременно можно спрогнозировать небольшой рост цен на традиционные энергоносители. Весьма расплывчата динамика ценовых пропорций по другим составляющим. Не исключено, что результаты оптимизации будут носить частный характер с точки зрения региона реализации.

Таким образом, поиск оптимального соотношения поверхности теплообменных аппаратов и температуры теплоносителя завершится не определением численных значений исследуемых величин, а сведется к нахождению функции, удобной для практического использования в конкретных условиях.

3.1.3 Алгоритм численного метода расчета энерго-ресурсосберегающих гидравлических отопительных систем

Переходя к решению поставленной задачи, следует признать, что аналитический подход к исследованию потребует наличия адекватных математических моделей, связывающих многочисленные факторы, которые определяют затраты на сооружение и эксплуатацию отопительных систем. Значительная часть этих моделей с большой вероятностью окажется дискретно-нелинейными, поскольку стоимости оборудования и монтажных работ дискретно зависят от образующих аргументов. Нелинейный характер моделей внесет дополнительные сложности в аналитическое решение и повысит вероятность ошибок. Принимая во внимание указанное обстоятельство, а также признавая дешевизну и возможности современной вычислительной техники, можно заключить, что определение оптимального сочетания исследуемых величин может быть достигнуто численным решением. При этом точность решения будет зависеть исключительно от качества уже имеющихся математи-

ческих взаимосвязей, а также от величин приращений, которые мы будем машинным образом задавать аргументам исследуемых функций. Для осуществления численного исследования задачи предложен нижеописанный алгоритм [98]. Этот алгоритм может быть реализован практически на любом современном компьютере, а также при ручных расчетах. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 1 приложения Б.

Основные логические функции алгоритма приведены в следующем описании.

Блок 1 («Начало») отражает запуск процесса. За блоком 1 следует блок 2 («Ввод начальных данных»). Здесь пользователь в диалоговом режиме осуществляет ввод начальных данных, характеризующих отапливаемое помещение и требования к температурному режиму. При этом следует ввести информацию, определенную в комментариях к алгоритму в таблице 2 приложения А.

В блоке 3 «Решающий блок» производится последовательное вычисление промежуточных теплотехнических параметров. Вычислительные операции блока 3 завершаются определением значения количества теплоты, которую должен выдать теплогенератор в течение года. В блоке 4 («Решающий блок») следует расчет температурного напора, а в блоке 5 («Решающий блок») происходит подсчет значения требуемой тепловой мощности P . Далее, в цикле с блока 6 по блок 12, производится последовательный расчет приведенных затрат с пошаговым приращением значения температуры теплоносителя. Это происходит следующим образом. В блоке 6 определяется значение температурного напора, который для первого обращения к циклу соответствует величине $20^{\circ}\text{C} + \Delta T$. При последующих обращениях исследуемое значение температурного напора будет увеличена на заранее заданный шаг ΔT . После этого осуществляется расчет рабочей поверхности отопительных приборов.

На следующем этапе происходит обращение к предварительно сформированной базе данных и нахождения стоимости соответствующих отопительных приборов, стоимости труб, вспомогательных материалов, а также стоимости монтажных и наладочных работ. Перечисленные операции осуществляются в

блоке 7 («Решающий блок»). Полученная сумма стоимостей по существу представляет собой величину капитальных затрат, обозначаемую символом КВ.

Далее, в блоке 8 («Решающий блок») определяется величина эксплуатационных затрат. Эксплуатационные затраты соответствует сумме амортизационных отчислений, затрат на текущий ремонт и уход, оплаты профилактических работ, а также стоимости получения требуемого количества теплоносителя с заданной температурой. Эта вычислительная операция также связана с обращением к базе данных, в которую должны заблаговременно вноситься соответствующие стоимостные значения. В блоке 10 «Решающий блок» осуществляется расчет приведенных затрат, опирающийся на результаты вычислений в блоках 8 и 9. В блоке 11 («Вывод на печать») происходит запоминание рассчитанной информации: температуры теплоносителя, поверхности отопительных приборов и соответствующей им величине приведенных затрат. Блок 12 («Блок сравнения») предназначен для организации циклических вычислений, начиная с блока 6. Это достигается сравнением текущего значения температуры с заранее заданным, конечным значением.

В блоках с 13 по 20 происходит циклическое обращение к вновь сформированному массиву на основании результатов вычислений в блоке 11 и поиск варианта с наименьшим значением приведенных затрат. Для этого в блоках 14 и 16 («Решающие блоки») вводятся новые переменные А и В, а в блоке 13 («Решающем блоке») – текущая переменная i , которая в блоке 15 («Решающий блок») получает приращение для организации ограниченных циклических операций. В блоке 17 («Решающий блок») происходит вычисление разности переменных А и В, обозначаемой символом S. Наконец, в блоке 18 («Блок сравнения») осуществляется сравнение этой разности с нулем и в соответствии с критерием условного перехода передача управления на блоки 13 или 21. В последнем из упомянутых блоков («Блоке вывода на печать») производится очередное запоминание ответов и передача команды к блоку 21 («Останов»).

Таким образом, при реализации описанного алгоритма оказывается возможным получение наиболее благоприятного сочетания температуры теплоносителя и поверхности отопительных приборов для анализируемого объекта.

3.2 Обоснование осциллирующего режима подключения грунтовых теплообменников

Иллюстрацией нового подхода к энергосбережению в децентрализованной отопительной системе с использованием теплового насоса и грунтовых теплообменников является способ их подключения к испарительному контуру в осциллирующем режиме. Этот подход основан на рассмотрении первого уравнения совокупности (2.1) в виде:

$$E(t) = k_3 k_5 \cdot \xi \sum_{j=1}^r \frac{dz_j}{dt} - k_4$$

где коэффициенты k_3 и k_5 характеризуют теплообменные процессы между грунтом и теплоносителем, множитель $\frac{dz_1}{dt}$ – скорость изменения температуры теплоносителя и k_4 – нецелевую потерю тепловой энергии,

z_j – характеристика подвижности молекул в теплообменных средах j -го теплообменника; j – номер теплообменника; r – количество теплообменников. Преимущества осциллирующего режима становятся очевидными при рассмотрении графика изменения температуры теплоносителя при кратковременном нагреве. Скорость изменения температуры теплоносителя в начале нагрева всегда больше, чем в окрестности установившегося режима. Следовательно, при поочередном подключении нескольких теплообменников и выполнении условия $\Delta t < T$, где Δt – продолжительность подключения j -го грунтового теплообменника и T – продолжительность подключения теплообменника в обычном режиме, множитель $\frac{dz_1}{dt}$ возрастет. В то же время, ограничение верхнего предела изменения температуры теплоносителя в каждом теплообменнике позволяет избежать чрезмерного охлаждения и промерзания грунта.

Приведем доказательство эффективности предложенного способа на основе анализа дифференциального уравнения нагрева теплоносителя.

Для предотвращения переохлаждения грунта при эксплуатации теплонасосных отопительных систем необходимо уменьшить тепловую нагрузку на грунтовые теплообменные аппараты. Уменьшение потребления теплоты за счет простого сокращения расхода теплоносителя не всегда приводит к желаемому результату, поскольку в этом случае мощность грунтового теплообменника используется не полностью. Увеличить поступление теплоты из недр Земли на сегодняшний день не представляется возможным, а варьирование ее отбором вполне осуществимо. Однако на практике задача соблюдения теплового баланса существенно усложняется наличием большого количества природных факторов, влияющих как на температуру грунта, так и на его тепло-технические параметры. Очевидно, что при разработке систем автоматического управления отбором тепловой энергии грунта необходимо принимать во внимание, что отдельные звенья этих систем будут обладать значительно отличающимися инерционными свойствами. Так, например, из-за небольшого перепада температур грунта и нагреваемого теплоносителя, а также вследствие низких теплопроводных свойств грунта изменение температуры теплоносителя до установившегося значения будет происходить за десятки часов. В то же время результат работы теплового насоса заметен уже через несколько минут после включения компрессора. Наличие этих и ряда других разноинерционных звеньев требует использования комбинированного принципа управления, при котором в пределах одной системы будут присутствовать контуры формирования управляющего воздействия по отклонению и по возмущению.

Для снижения тепловой нагрузки, приходящейся на используемый в качестве источника низкопотенциальной энергии участок грунта, предложено размещение на нем нескольких (двух, трех и более) поочередно подключаемых теплообменников [164]. Эти теплообменники должны располагаться на некотором расстоянии друг от друга и подключаться к первичному контуру теплового насоса в соответствии с заданным алгоритмом.

В работе [210] рассмотрена последовательность работы теплонасосной отопительной системы, содержащей три грунтовых теплообменника. В на-

чальный момент времени к тепловому насосу подключен один (назовем его первым) грунтовый теплообменник. По мере отбора тепловой энергии температура грунта в окрестности первого теплообменника будет уменьшаться, а температура теплоносителя – расти. При этом два других (второй и третий) теплообменника остаются в отключенном состоянии. Через некоторое время происходит отключение первого теплообменника и подключение второго. Очень важно, чтобы за время подключения первого теплообменника температура циркулирующего в нем теплоносителя не достигла установившегося значения. Далее происходит уменьшение температуры грунта в окрестности второго теплообменника, а в окрестности первого теплообменника она начинает естественным образом увеличиваться. После некоторого снижения температуры в окрестности второго теплообменника он отключается, а третий теплообменник подключается. Далее цикл повторяется. При работе отопительной системы по описанному принципу удастся не только предотвратить переохладение грунта, но также снять большее количество тепловой энергии с тех же теплообменников за то же время, чем при традиционном способе.

Справедливость этого утверждения доказана в работе [63] на основе анализа динамики теплообменных процессов при традиционном режиме, сопровождающемся нагревом теплоносителя от начальной $v_{нач}$ до установившейся $v_{уст}$ температуры за время от 0 до τ , и при импульсном режиме за время от 0 до $1/3\tau$. В процессе доказательства определены и сравнены между собой соответствующие этим режимам количества извлеченной тепловой энергии $Q_2^{(1)}$ и $Q_2^{(2)}$:

$$\begin{aligned}
 Q_2^{(2)} - Q_2^{(1)} &= 3mc(v_{нач} - v_{уст}) \cdot \left(e^{\frac{-\tau}{3T}} - 1 \right) - mc(v_{нач} - v_{уст}) \cdot \left(e^{\frac{-\tau}{T}} - 1 \right) = \\
 &= mc(v_{нач} - v_{уст}) \cdot \left(3e^{\frac{-\tau}{3T}} - 3 - e^{\frac{-\tau}{T}} + 1 \right) = mc(v_{нач} - v_{уст}) \cdot \left(3e^{\frac{-\tau}{3T}} - e^{\frac{-\tau}{T}} - 2 \right) \quad (2.4)
 \end{aligned}$$

где m – масса нагреваемого теплоносителя, кг; c – теплоемкость теплоносителя, Дж/кг · град; v – текущая температура теплоносителя, град; T – постоянная времени, с. Из выражения (2.4) следует, что при всех реальных значениях аргументов искомая разность является положительной.

На рисунке 3.1 представлены графики изменения температуры теплоносителя при непрерывном и импульсном режимах нагрева для отопительной системы с одним (а) и тремя (б,в,г) грунтовыми теплообменниками в интервале от 1°C до 7°C.

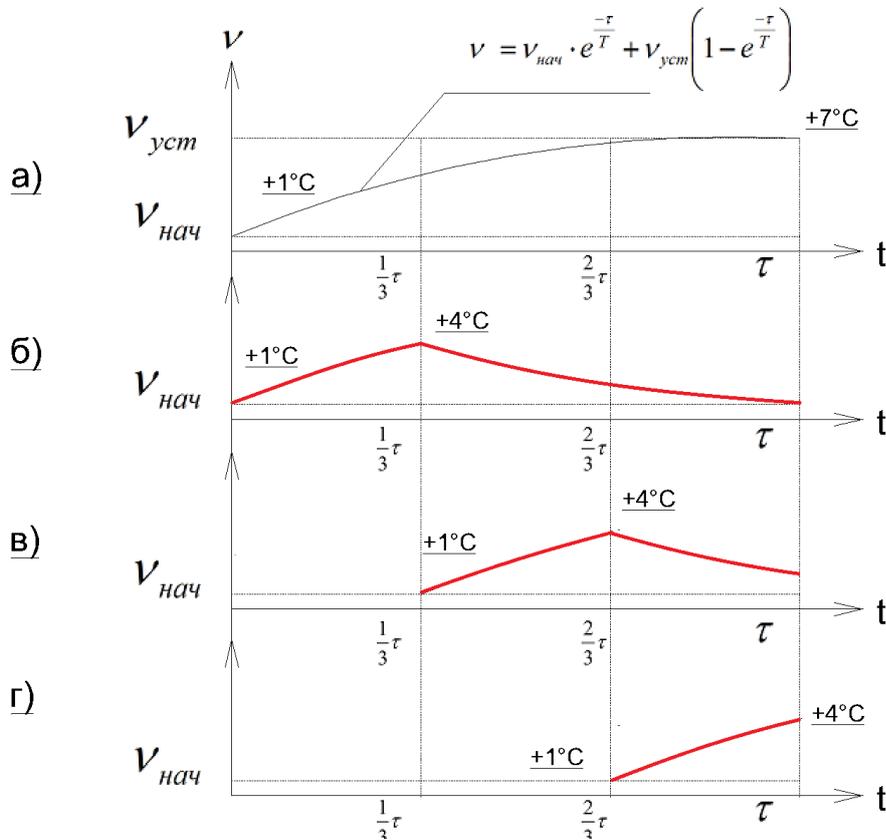


Рисунок 3.1 – Графики изменения температуры низкопотенциального теплоносителя в грунтовых теплообменниках

Полученные результаты позволили утверждать, что подключение теплообменников в теплонасосной отопительной системе в импульсном режиме с энергетической точки зрения более рационально. Объем тепловой энергии, снятой с трех поочередно подключаемых грунтовых теплообменников оказывается большим, чем при использовании одного теплообменника в течение

того же времени [144]. Если традиционный способ нагрева теплоносителя происходил в соответствии с графиком на рис.3.1, то импульсный режим предполагает нагрев трех независимых порций теплоносителя от начальной температуры $V_{нач}$ до значения в конечный момент подключения теплообменника. Графически нагрев теплоносителя в импульсном режиме проиллюстрирован на рисунке 3 приложения Б.

Экспоненциальный характер кривой нагрева, подтверждаемый графическим изображением решения, свидетельствует о неравномерном характере процесса. На первом этапе нагрев происходит довольно быстро, затем он замедляется, и наконец, при установившемся значении температуры, скорость нагрева становится равной нулю. Следовательно, на первом участке кривой за одно и то же время телу сообщается большее количество теплоты, чем на участке в области насыщения. Из этого заключения легко сделать вывод, что нагрев теплоносителя в нагруженном теплообменнике наиболее эффективно производить именно на начальном промежутке времени [210]. По окончании этого промежутка процесс нагрева целесообразно прервать, и подключить к потребителю другой такой же теплообменник. Внутри второго теплообменника находится низкопотенциальный теплоноситель с исходной (относительно низкой) температурой. В момент подключения второго теплообменника разность температур грунта и теплоносителя будет максимальной, что является предпосылкой для теплообмена с относительно высокой скоростью. По мере того, как теплоноситель во втором теплообменнике будет прогреваться, а грунт в его окрестности остывать, естественная теплота Земли будет прогревать грунт в окрестности первого теплообменника. Затем переключение теплообменников можно повторить.

Для более гибкого дозирования отбираемой теплоты количество теплообменников может быть увеличено до трех-четырех.

Кроме того, при реализации рассмотренного способа появляется еще один параметр, позволяющий осуществлять гибкое управление интенсивностью от-

бора тепловой энергии грунта – частота переключения теплообменников. Варьирование частотой наряду с изменением расхода низкопотенциального теплоносителя, открывает возможность применения сложных законов управления отопительной системой и гарантированно избежать переохлаждения грунта, способного привести к его промерзанию зимой.

Для технической реализации осциллирующего режима подключения грунтовых теплообменников к испарительному контуру теплового насоса разработано, изготовлено и испытано несколько технических решений [317, 326, 333, 190, 206], функциональные схемы которых представлены на рисунках 3, 4 и 5 приложения В. В качестве примера на рисунке 3 приложения Б приведена временная диаграмма работы пневматического устройства. По мере повышения требований к процессу отбора теплоты грунта, алгоритмы управления тепловыми потоками и технические средства для их реализации становятся все более сложными [189]. Значительное повышение сложности алгоритма может быть также обусловлено увеличением количества теплообменников, различными условиями их взаимодействия с грунтом (различными плотностями и составом грунта), а также различными теплоизоляционными свойствами трубопроводов. В связи с этим последующее развитие автоматических устройств управления потоками теплоносителя можно ожидать в направлении использования элементов искусственного интеллекта в составе самоорганизующихся и самонастраивающихся автоматических систем.

Таким образом, на основании вышеприведенных рассуждений можно сделать следующие выводы:

1. Во избежание утраты работоспособности теплонасосной отопительной системы в холодное время года, а также с целью исключения нарушения экологического равновесия вследствие чрезмерного переохлаждения грунта, отбор теплоты от грунтовых теплообменников целесообразно осуществлять поочередно в импульсном режиме.
2. Продолжительность подключения каждого грунтового теплообменника в импульсном режиме не должна достигать продолжительности переход-

ного процесса нагрева теплоносителя при традиционном способе отбора теплоты.

3.3 Электризационное осаждение пыли в помещениях с обогреваемыми полами

3.3.1 Основные закономерности распределения и движения пыли в помещении с обогреваемыми полами

Наличие пыли в воздушной среде помещений помимо появления медицинских и санитарных проблем создает неблагоприятные условия для работы отопительных систем. Во-первых, для снижения содержания пыли в воздухе приходится прибегать к дополнительной принудительной вентиляции или проветриванию помещения, что в холодное время года приводит к перерасходу тепловой энергии. Во-вторых, частицы пыли неминуемо оседают на поверхности теплообменных аппаратов (трубах, отопительных радиаторах и пр.), что ухудшает условия теплообмена и также определяет повышение тепловых затрат. В первом уравнении совокупности (2.1) эти факторы характеризуются коэффициентами k_4 и k_5 соответственно. Следовательно, для соблюдения условия $E(t) = const$ следует принимать меры либо для увеличения k_5 , либо для уменьшения k_4 . Во избежание роста энергозатрат при увеличении k_5 остается возможным уменьшение k_4 , что на практике будет означать удаление пыли.

Состав и содержание пыли в помещениях различных категорий регламентируется рядом санитарных требований [356, 352], а в конструкциях современных сельскохозяйственных сооружений в обязательном порядке предусматриваются меры, предотвращающие превышение этими показателями установленных значений [254]. Вместе с тем, активные действия человека, направленные на повышение своего комфорта, нередко сопровождаются вмешательством в среду обитания. Проектируя новые сооружения, совершенствуя системы вентиляции или отопления, мы нередко упускаем из виду оборотные стороны этих нововведений. Аналогичная ситуация образовалась и с распро-

странением обогреваемых полов, при эксплуатации которых содержащаяся в помещении пыль увлекается восходящими потоками теплого воздуха и сосредотачивается на уровне органов дыхания.

В работе [210] проанализированы основные источники происхождения пыли, представлены результаты классификации пылевых частиц по дисперсности и составу. При этом особое внимание уделено электрическим свойствам пыли, среди которых выделяются электрическое сопротивление и электрический заряд.

Электрическое сопротивление пыли определяется поверхностной и объемной проводимостью [210]. Электрические свойства поверхностного слоя частиц пыли отличаются от свойств основной массы вследствие адсорбирования влаги и газов на их поверхности. Объемная проводимость определяется составом вещества частицы. Эта величина с ростом температуры повышается, так как при этом происходит увеличение энергии электронов. На рисунке 4 приложения Б представлена зависимость сопротивления слоя пыли от температуры. В диапазоне комнатных температур некоторый прогрев пыли увеличивает ее адсорбционные свойства по отношению к влаге, содержащейся в воздухе. При этом поверхностная проводимость частиц повышается, а сопротивление падает. При дальнейшем повышении температуры преобладает испарение влаги, сопровождающееся увеличением сопротивления. При последующем увеличении температуры происходит увеличение теплового возбуждения электронов и сопротивление вновь уменьшается. Таким образом, изменяя температуру пыли, мы получаем возможность управлять ее сопротивлением. Кроме того, удельное электрическое сопротивление частиц зависит от их химического состава, размеров и плотности.

Частицы пыли могут быть электрически нейтральными или иметь разнополярные заряды. Более того, аэрозольные системы могут одновременно содержать и положительные, и отрицательные частицы. В таком случае суммарный заряд системы определяется соотношением зарядов отдельных частиц. Электрический заряд приобретает частицами как в процессе образования, так и

при нахождении их в воздухе во взвешенном состоянии. Приобретение заряда может быть обусловлено взаимным трением частиц, их трением о воздух, адсорбацией ионов и ионизацией среды. Электрическое состояние пыли не является неизменным. При взаимодействии друг с другом и окружающей средой частицы пыли либо заряжаются, либо становятся нейтральными.

Перечисленные электрические свойства пыли оказывают влияние распределение частиц в пространстве, на их движение, а также на характер воздействия на живые организмы. Соотношения размеров частиц пыли с расстояниями между ними в большинстве случаев позволяет рассчитывать силовое взаимодействие по закону Кулона.

Несмотря на явно случайный характер распределения полярности заряда частиц, нельзя не отметить и некоторые закономерности: например, неметаллические частицы чаще заряжены положительно, а металлические – отрицательно [346, 347]. В таблице 3 приложения А приведены полярности зарядов частиц пыли, состоящие из наиболее распространенных веществ и их соединений.

Очевидно, что распределение и движение частиц пыли в обогреваемых помещениях сильно зависят от их размеров и массы. При этом сложность учета геометрических размеров частиц обусловлена нерегулярностью и неправильностью их форм. Поэтому в дальнейших рассуждениях сделаем допущения о простых геометрических формах частиц и отсутствии влияния их вращения на динамику движения. Кроме того, будем считать, что кривизна траекторий элементарных объемов несущего потока настолько незначительна, что ею можно пренебречь при оценке неравномерности давления на пыль.

Расположение частиц во взвешенном состоянии и перенос их в пространстве обогреваемого помещения осуществляется турбулентными потоками воздуха. Эти потоки движутся с небольшими скоростями, а их турбулентность носит статистический характер. Аналогично и частицы пыли, являясь элементами большой материальной совокупности, также подчиняется статистическим закономерностям. Поскольку в 1 см^3 взвешенной пыли при concentra-

ции 1 г/м^3 содержится около 100 миллионов частиц размером до 5 мкм, описание распределения пыли в пространстве должно производиться с применением статистических методов. С точки зрения математической статистики пыль можно представить как статистическую совокупность. На каждую категорию размеров этой совокупности приходится различная доля массы всех взвешенных частиц. При этом отдельные частицы пыли являются членами статистической совокупности. Количественным признаком, по которому осуществляется разделение пыли на категории (фракции) при дисперсионном анализе, может выступать аэродинамический диаметр частицы, являющийся аргументом статистического множества. Общее количество частиц или общая масса исследуемой пыли представляет собой объем статистической совокупности. Количество частиц в каждой категории или их массу можно считать численностью категории или частотой. Эти частоты, отнесенные к объему совокупности, являются относительными частотами.

С некоторыми допущениями будем считать, что изменение размеров частиц пыли представляет собой непрерывный ряд. Тогда геометрическое изображение дисперсного состава может быть представлено кривой плотности распределения – дифференциальной кривой.

Длительность процесса полного оседания пыли на поверхность пола при отсутствии внешних возмущений, составляет десятки часов. Если это помещение подвергается эксплуатации, то в течение периода оседания пыли в нем будут иметь место перемещения людей, манипуляции с окнами и дверьми, работа вентиляторов, осветительных приборов и другого оборудования. Все перечисленные факторы создают локальные возмущения воздушной среды. Часть содержащейся в помещении пыли под действием этих возмущений начинает сложнопредсказуемое движение. Если в помещении имеется теплый пол или отопительные радиаторы, движение частиц пыли становится еще сложнее. Кроме того, имеющиеся в помещении элементы вытяжной вентиляции также будут оказывать влияние на перемещение пыли. При этом интенсивность этого влияния не остается постоянной, так как она зависит от разно-

сти температур воздуха внутри и снаружи помещения, а также от атмосферного давления. Траектория перемещения частиц пыли также зависит от высоты и формы потолка, от конфигурации и размеров помещения. Наконец, существенное воздействие на движение пыли окажут электрические свойства материалов стен, мебели и прочих материальных объектов. Здесь решающее значение будет иметь не только полярность заряда этих объектов, но и полярность зарядов преобладающих пылевых частиц.

Таким образом, распределение и движение пыли в помещении зависит от множества факторов, присутствие и количественная характеристика которых являются случайными. Поэтому точное вычисление концентрации пыли в различных точках обогреваемого помещения едва ли возможно. Перечисленные обстоятельства позволили сделать вывод о возможности использования внешних электрических полей для направленного перемещения частиц пыли и их осаждения [91,73].

3.3.2 Исследование влияния неоднородного электрического поля на частицы пыли

При создании условий для осаждения частиц пыли на обогреваемом полу, необходимо принять во внимание силы, влияющие на эти частицы в процессе их циркуляции за счет подъема теплых слоев воздуха. Прежде всего, следует остановиться на определенном виде пыли [295, 240] и ввести соответствующие ограничения по массе частиц, их составу и размерам.

В работе [210] автором рассмотрено распределение бытовой пыли по составу, приведено обоснование допущения однородного состава и шарообразной формы частиц и проанализирована полярность зарядов, приобретаемых частицами пыли при их электризации (см.таблица 3 приложения А). Сила, препятствующая подъему частиц пыли, рассмотрена как составляющая часть, создаваемая электрическим полем $F_{эл}$. Для оценки величины этой части проанализировано неравенство: $F_{эл} + F_T \geq F_{под}$, где F_T – сила тяжести, Н; $F_{под}$ – подъемная сила восходящего воздушного потока, Н.

Сила тяжести определена по известной массе m частицы: $F_T = m \cdot g$,

где g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Результаты расчета объема и массы частиц пыли для трех узловых линейных размеров (0,5 мкм, 75 мкм и 200 мкм) сведены в таблицу 4 приложения А. Для определения подъемной силы восходящего воздушного потока необходимо знать значения температур и соответствующие им плотности воздуха в различных точках помещения. Принимая во внимание практический опыт эксплуатации современных помещений, можно утверждать, что максимальная разность температур на высотах от пола до потолка обычно не превышает 6...9°C. Для таких разностей температур значения разностей плотностей могут достигать 8...15%. Значения плотностей воздуха при нормальном давлении, соответствующих температурам от 5 до 30°C, приведены в таблице 5 приложения А.

Величину подъемной силы, оказываемой восходящим теплым воздухом на частицу пыли, предложено определять по формуле:

$$F_{\text{под}} = (\rho_x - \rho_m) \cdot gVC_x, \quad (3.5)$$

где ρ_x и ρ_m – плотность холодного и теплого слоев воздуха соответственно, кг/м³; V – объем условного пространства, ограниченного цилиндром с основанием πR^2 и высотой, соответствующей расстоянию от пола до частицы, м; C_x – коэффициент лобового сопротивления.

При этом сделаны допущения, что в пределах условного пространства воздух обладает одинаковой температурой и одинаковой плотностью и в объеме условного пространства не перемешивается с воздухом окружающей среды, оказывая однозначное давление на частицу пыли снизу вверх (см. рисунок 3.2). С одной стороны, слои теплого воздуха, прогретые полом, действительно характеризуются меньшей плотностью и будут подниматься вверх. С другой стороны, воздушные слои, ранее поднявшиеся в верхнюю зону помещения, претерпевают охлаждение и начнут вытесняться восходящими потоками. Однако спрогнозировать траекторию движения остывающего воздуха очень сложно, поскольку она сильно зависит от соотношения температур теплых и холодных

слоев, а также от наличия предметов между полом и частицами пыли, или частицами и верхними остывающими воздушными слоями. Эти предметы играют роль заградительных экранов и существенно искажают температурные поля [60].

При оценке подъемной силы принято во внимание, что температура воздуха внутри условного пространства составляет $+25^{\circ}\text{C}$, а температура снаружи – $+20^{\circ}\text{C}$. В соответствии с данными таблицы 4 приложения А разность плотностей воздуха для этих температур окажется равной $0,625 \text{ кг/м}^3$.

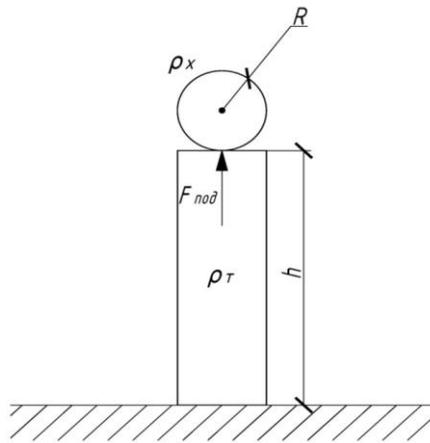


Рисунок 3.2 – Действие подъемной силы, обусловленной восходящим потоком теплого воздуха

Величина объема условного пространства, входящего в формулу (3.5), определяется размерами проекции частицы на плоскость, параллельную земной поверхности, и расстоянием от пола до частицы h . И если размеры частиц могут быть приняты в соответствии с вышеприведенными рассуждениями, то при обосновании расстояния от пола до частицы мы вновь оказываемся в условиях неопределенности: с одной стороны, с увеличением расстояния условный объем и подъемная сила увеличиваются, с другой, – при удалении от пола начинает проявляться уменьшение температуры. Но в то же время, при последующем удалении от пола температура воздушных слоев вновь увеличивается, поскольку прогретый воздух до своего остывания сосредотачивается в верхней зоне помещения. Таким образом, в объекте с обогреваемыми полами можно

ожидать минимум температуры на некотором расстоянии от пола. В то же время величина подъемной силы, действующей на частицы пыли, будет приходиться на области минимума температуры [73].

Из приведенных выше рассуждений можно сделать вывод, что пыль, уже собравшаяся на обогреваемом полу, сама по себе подниматься не будет. Эта пыль может подняться, если она отделена от пола и подхвачена восходящим потоком. Отделение пыли от пола может произойти в случае приложения внешнего механического воздействия: бокового воздушного потока, вибрации или резкого нажатия обуви при ходьбе. Принимая во внимание необходимость наличия воздушного слоя между полом и частицей пыли для ее подъема примем $h = 0,05$ м.

Для определения силы, обусловленной электрическим полем, воспользуемся неравенством $F_{эл} \geq F_{под} - F_T$. Результаты расчета F_T , $F_{под}$ и $F_{эл}$ для рассматриваемых видов и размеров частиц пыли сведены в таблицу 6 приложения А.

Из таблицы 6 приложения А видно, что ряд значений силы воздействия электрического поля имеет отрицательный знак. Это означает, что для осаждения соответствующих частиц пыли дополнительных усилий не требуется. Такие частицы могут оказаться в воздухе, однако с течением времени самопроизвольно осядут на пол. И, напротив, – при положительных $F_{эл}$ для предотвращения подъема пыли необходимо соответствующее усилие, которое может быть обусловлено воздействием искусственно созданного электрического поля.

Поскольку решающее значение в уравнении баланса сил принадлежит высоте расположения частицы пыли над полом, значения $F_{эл}$ рассчитаны для $h = 0,001 \dots 0,1$ м. При этом в интервале $0,001 \text{ м} \leq h \leq 0,01 \text{ м}$ шаг изменения высоты составляет $0,001$ м, а в интервале $0,01 \text{ м} \leq h \leq 0,1 \text{ м}$ – $0,01$ м. Рассчитанные значения $F_{эл}$ сведены в таблицу 7 приложения А [210, 60].

В результате анализа данных таблицы 7 приложения А, сделан вывод, что сила, необходимая для предотвращения подъема частиц пыли восходящими

потоками воздуха, с увеличением высоты их расположения над полом неуклонно растет.

3.3.3 Технические средства для электризационного осаждения пыли на поверхности обогреваемых полов

На сегодняшний день известны несколько способов создания $F_{эл}$, используемых для воздействия на материальные объекты. На этих способах основано действие электроосаждающих фильтров воздуха [285], устройств управления потоками аэрозоля [284], а также электросепараторов [204]. Наилучшими энергетическими показателями обладает способ, предусматривающий взаимодействие предварительно заряженных частиц с внешним электрическим полем. Однако для осаждения пыли на полу этот способ вряд ли пригоден, поскольку сообщение электрических зарядов частицам, распределенных по всему объему помещения и находящихся во взвешенном состоянии, в реальных условиях невозможно. Перспективный способ создания $F_{эл}$ основан на использовании пондеромоторных сил, которые образуются в диэлектрическом теле, находящемся под воздействием явно неоднородного электрического поля. Когда незаряженное тело оказывается под влиянием электрического поля, на его поверхности появляются связанные заряды противоположных знаков. В результате на разные части тела со стороны поля будут действовать противоположно направленные силы (рисунок 3.3). При этом в условиях неоднородного поля преобладающее влияние будет иметь та сила, которая действует на заряды, находящиеся в более сильном поле. Поэтому незаряженное тело начинает втягиваться в поле с более высокой напряженностью. На рисунке 3.3 такой преобладающей силой оказывается F_1 .

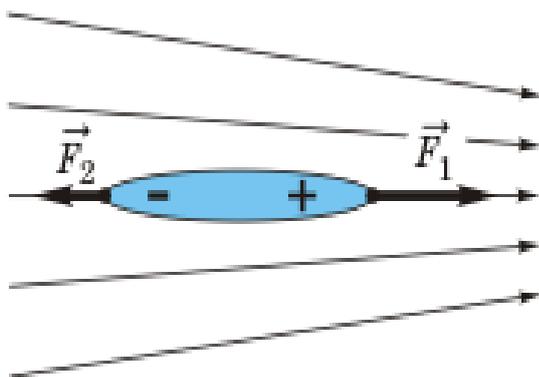


Рисунок 3.3—Втягивание диэлектрика в область поля с большей напряженностью

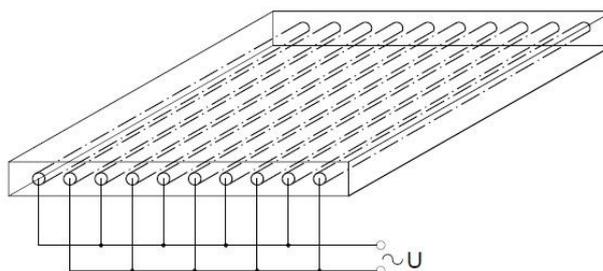


Рисунок 3.4 – Схема размещения и подключения электродов

Пондеромоторная сила, действующая на частицу пыли шарообразной формы, рассчитывается в соответствии с выражением [303]:

$$F_{\text{эл}} = \varepsilon_1 R^3 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} E \frac{dE}{dx} \quad (3.6)$$

где ε_1 и ε_2 – диэлектрические проницаемости воздуха и вещества частицы соответственно; E – напряженность поля, В/м; $\frac{dE}{dx}$ – производная напряженности в направлении максимального изменения.

При $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ сила $F_{\text{эл}}$ – отрицательная, и частица пыли выталкивается из более интенсивных в более слабые участки поля; при $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ – наоборот, частица притягивается. Принимая во внимание, что $\varepsilon_1 = 1$, запишем выражение (3.6) в виде: $F_{\text{эл}} = \varepsilon_1 R^3 \frac{\varepsilon_2 - 1}{\varepsilon_2 + 2} E \frac{dE}{dx}$

Величина $E \frac{dE}{dx}$ зависит от характера электрического поля. В неоднородном электрическом поле на частицу пыли действуют одновременно две силы: пондеромоторная (обусловленная неоднородностью поля) и кулоновская (обусловленная наличием на частице электрического заряда). Для частиц с радиусом порядка 1 мм кулоновская сила превышает пондеромоторную в сотни раз, а для более мелких частиц справедливо обратное соотношение.

Пондеромоторные силы не зависят от направления напряженности, так как одновременно с его изменением меняется и направление поляризации. Пондеромоторные силы сравнительно малы и резко убывают с возрастанием рас-

стояния между электродами. При увеличении напряженности электрического поля и уменьшении расстояния между электродами количество притягивающихся частиц возрастает.

Неоднородное электрическое поле может быть создано системой электродов, представляющих собой бифилярную обмотку из двух параллельных проводников [306]. Эта обмотка выполнена изолированным проводом, подключенным к источнику разнополярного напряжения и уложенным под верхней поверхностью пола (рисунок 3.4). При этом примерная картина распределения электрического поля в окрестности бифилярной обмотки будет иметь вид, изображенный на рисунке 3.5.

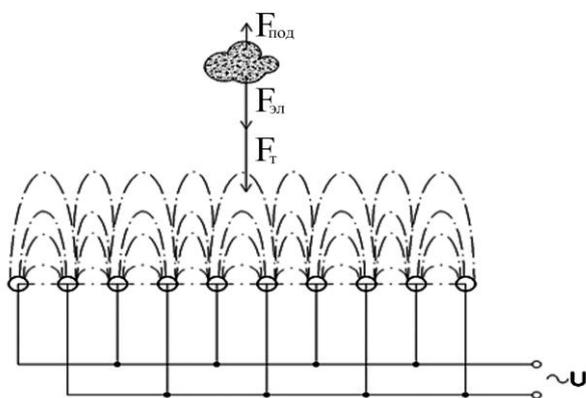


Рисунок 3.5 – Схема действия сил на частицу пыли в неоднородном электрическом поле

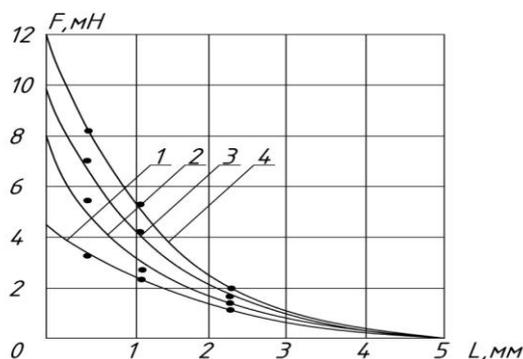


Рисунок 3.6 – Зависимость электрической силы от расстояния между диэлектрическими частицами и электродами, а также от величины приложенного напряжения; 1. $U=2$ кВ, 2. $U=3$ кВ, 3. $U=4$ кВ, 4. $U=5$ кВ.

В классической теории электрического поля определены факторы и характер их взаимного влияния на формирование $F_{эл}$ с учетом особенностей формы, расположения и изоляции электродов:

$$F_{\text{эл}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 U^2 S_{\text{эфф}} \cos \frac{\alpha}{2}}{\left[2\delta + 2 \frac{S_1}{S_3} l_3 \left(\frac{Y_1^2 + \varepsilon_0^2 \varepsilon_1^2 \omega^2}{Y_3^2 + \varepsilon_0^2 \varepsilon_2^2 \omega^2} \right)^{1/2} + \frac{S_1}{S_2} l_2 \left(\frac{Y_1^2 + \varepsilon_0^2 \varepsilon_1^2 \omega^2}{Y_2^2 + \varepsilon_0^2 \varepsilon_2^2 \omega^2} \right)^{1/2} \right]^2} \quad (3.7)$$

где U – напряжение между проводниками бифилярной обмотки, В; $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ – относительные диэлектрические проницаемость вакуума ($\varepsilon_0 = 8,5 \cdot 10^{-12}$ Ф/м), воздуха, частицы пыли, изоляции электродов соответственно; Y_1, Y_2, Y_3 – электропроводность воздуха, частицы пыли и изоляции электродов соответственно; δ – длина средней линии потока в воздушном зазоре, l_2 и l_3 – длины средних линий потока в частице пыли и в изоляции электродов соответственно; S_1, S_2, S_3 – средние сечения вероятных потоков, пронизывающих воздушный зазор, частицу пыли и изоляцию электродов соответственно; ω – циклическая частота подводимого напряжения; α – угол между силами в направлении заряженных проводников; $S_{\text{эфф}}$ – эффективная поверхность частицы пыли (часть поверхности, на которую действует электрическая сила в одинаковой мере, как и всю поверхность частицы). Вместе с тем, практическое использование формулы (3.7) затруднено ввиду наличия в ней значений $\delta, l_2, l_3, S_1, S_2, S_3$, которые могут быть определены только экспериментально. Поэтому для расчета параметров устройства, обеспечивающего требуемую $F_{\text{эл}}$, предлагается воспользоваться ранее полученными экспериментальными данными по исследованию сил, действующих на диэлектрические частицы массой от 0,5 мг. Эксперимент проводился на установке с системой электродов, выполненных проводом АПВ 2,5 при напряжениях питания 2, 3, 4 и 5 кВ и расстояниях между частицами и рабочим органом установки от 0 до 5 мм. По результатам эксперимента были построены зависимости силы $F_{\text{эл}}$, от расстояния между частицами и электродами h при различных напряжениях U (рисунок 3.6).

Из графика на рисунка 3.6 видно, что при удалении частиц от электродов сила $F_{\text{эл}}$, быстро убывает, практически исчезая при $h = 0,005$ м. Распространяя результаты эксперимента на нашу задачу, мы можем заключить, что столь малая высота выходит за пределы интересующего нас интервала, хотя замерен-

ные величины сил при $h = 0,001 \dots 0,004$ м в среднем на три порядка превышают минимально требуемые расчетные значения. Для уверенного достижения результата по принудительному осаждению пыли предложено между электродами основной пары бифилярной обмотки разместить электрод дополнительной пары. При этом второй электрод дополнительной пары располагается с внешней стороны основной пары, а основная и дополнительная пары бифилярной обмотки идентичны (рисунок 3.7).

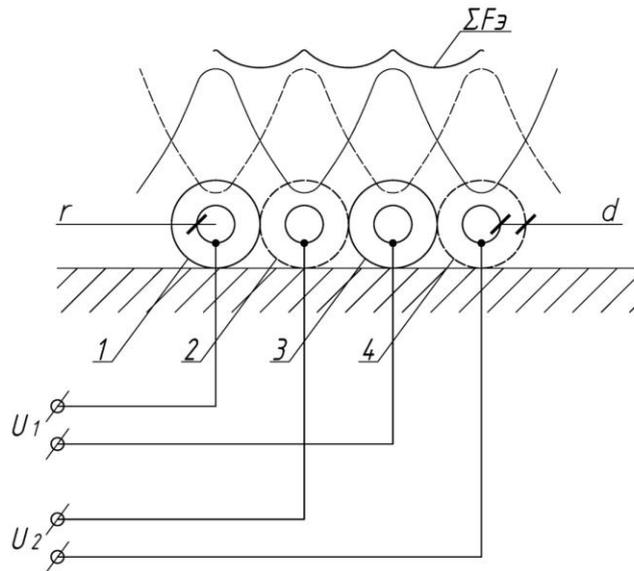


Рисунок 3.7 – Фрагмент чередующегося расположения и подключения электродов для образования суммарной силы $\Sigma F_{\text{эл}}$.

Основную пару бифилярной обмотки составляют электроды 1 и 3, дополнительную пару – 2 и 4. Во избежание взаимного влияния электроды разных пар не должны иметь гальванической связи, для чего питание каждой пары осуществляется от разных источников. Поскольку расстояние между проводами одной пары увеличится на величину внешнего диаметра провода (как минимум), для сохранения требуемой напряженности электрического поля напряжение питания следует увеличить.

Будем считать, что радиус электрода (токоведущей части провода) составляет величину R , а толщина изоляции провода – d . Тогда расстояние между центрами пары взаимодействующих электродов составит величину

$$L = (R + d) + (2R + 2d) + (R + d) = 4(R + d)$$

При отсутствии электрода между взаимодействующей парой это расстояние окажется вдвое меньше: $L_0 = 2(R + d)$. Следовательно, для сохранения напряженности поля напряжение питания в предложенной схеме расположения и подключения электродов должно быть увеличено до 6...8 кВ.

Вместе с тем, суммарная сила $\sum F_{эл.}$, действующая на частицу пыли, будет определяться действием двух полей. Произведя геометрическое суммирование этих составляющих, найдем ординаты $\sum F_{эл.}$. Как видно из рисунка 3.7 кривая изменения суммарной силы $\sum F_{эл.}$ на плоскости, перпендикулярной полу, в направлении образования витков бифилярной обмотки оказывается заметно равномернее исходных кривых. Эта равномерность обеспечивает надежное взаимодействие поля практически со всеми частицами пыли, расположенными на расчетной высоте. Кроме того, чередование обмоток по предложенной схеме повышает величину силы в среднем на 80 % в областях точек соприкосновения проводов.

Варьируя соотношением диэлектрической проницаемости частиц пыли и материала изоляции, а также толщиной изоляции и напряжением между проводниками бифилярной обмотки, можно изменять величину $\sum F_{эл.}$, что, в свою очередь, влияет на интенсивность оседания частиц на поверхности обогреваемого пола. Периодически, по мере накопления пыли, необходимо выключать питающее напряжение и производить влажную уборку помещения. Примечательно, что расход электрической энергии на создание неоднородного электрического поля ничтожен.

Таким образом, диэлектрический способ искусственного осаждения пыли, реализованный в разработанном устройстве на основе бифилярной обмотки, уложенной под верхней поверхностью пола, устраняет один из главных недостатков систем отопления с обогреваемыми полами и открывает возможность их безвредного использования в помещениях длительного пребывания людей.

3.4 Электротехнологические способы энерго-ресурсосбережения в газовых водогрейных котлах и технические средства для их осуществления

3.4.1 Анализ процесса горения газа и влияния условий его протекания на технико-экономические и экологические показатели

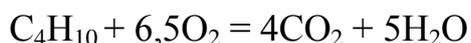
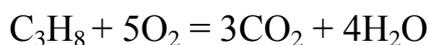
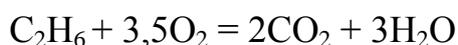
Для определения направления разработки нового способа энерго-ресурсосбережения при эксплуатации маломощных газовых водогрейных котлов используем первое уравнение совокупности (2.1) при $k_2 \frac{dx_1}{dt} = 0$. Оставшиеся слагаемые $k_3 k_5 \cdot \xi \frac{dz_2}{dt}$ и k_4 определяют энергозатраты на образование озона, воздействие озона на процесс горения и нецелевые потери соответственно. При этом коэффициент k_1 характеризует геометрические размеры и форму электродов, коэффициент k_3 – интенсивность молекулярного движения, а коэффициент k_5 – скорость окислительного процесса. Увеличение количества озono-воздушной смеси, а также ее концентрации за счет увеличения слагаемого $k_1 \frac{d\varphi_1}{dt}$ нецелесообразно, поскольку вызовет увеличение энергозатрат. В связи с этим для достижения энергосберегающего эффекта последующие исследования должны быть направлены на создание условий для повышения эффективности воздействия озона на горение и уменьшение затрат на транспортировку озono-воздушной смеси в топочную камеру. Поскольку слагаемое $k_3 k_5 \cdot \xi \frac{dz_2}{dt}$ содержит массовый коэффициент ξ , создавая благоприятные условия горения, можно рассчитывать на уменьшение затрат газа.

Современные исследования, направленные на экономию природного газа при эксплуатации водогрейных котлов малой мощности, а также на удовлетворение ужесточающимся требованиям к количеству и составу выбросов в атмосферу осуществляются по следующим направлениям:

1. Совершенствование топочных камер и дымоходов.
2. Поиск внешних воздействий, положительно влияющих на процесс горения.
3. Оптимизация режимов подачи газа и качественного состава окислителя.

В работах [29, 212] проанализированы достижения и перспективы названных направлений и сделан вывод о целесообразности поиска новых видов окислителя и режимов их подачи в камеру сгорания [258, 288]. При этом особый интерес вызывает окислитель, представляющий собой озono-воздушную смесь. Своеобразие использования озono-воздушной смеси заключается в невозможности ее заблаговременного приготовления и последующего расходования по мере необходимости. В то же время привлекательность озono-воздушной смеси определяется простой технологией ее получения при минимальных затратах энергии непосредственно перед подачей в топочную камеру. Кроме того, концентрация озона в озono-воздушной смеси достаточно легко регулируется посредством изменения напряжения питания озонатора или продолжительности озонирования фиксированного объема воздуха. Целесообразность использования озона при сжигании газа в топочных камерах газовых водогрейных котлов подтверждается следующими соображениями.

Известно, что природный газ содержит примерно 94% метана (CH_4), 2% этана (C_2H_6), 2% пропана (C_3H_8), 1% бутана (C_4H_{10}), 0,5% азота (N_2) и 0,5% углекислого газа (CO_2) [257]. При этом азот и углекислый газ в процессе горения не участвуют. Остальные компоненты природного газа подвергаются окислению в соответствии с реакциями [304, 355]:



Расчет требуемого количества кислорода для сжигания природного газа в промышленном котле типа АГВ с тепловой мощностью 26 кВт и часовым потреблением топлива $2,0 \text{ м}^3$ позволил определить следующие соотношения объемов составляющих:

$$\text{— метан: } 2 \times 0,94 = 1,88 \text{ м}^3;$$

$$\text{— этан: } 2 \times 0,02 = 0,04 \text{ м}^3;$$

– бутан: $2 \times 0,01 = 0,02 \text{ м}^3$;

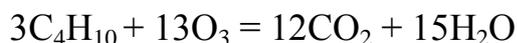
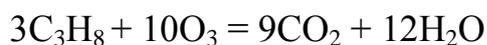
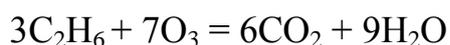
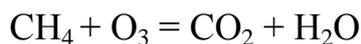
– пропан: $2 \times 0,02 = 0,04 \text{ м}^3$.

При допущении пропорциональности объемов газов их количеству, определяемого числом молей [51, 83], сделано заключение, что для сжигания метана потребуется в два раза больше кислорода, чем составляет объем самого топлива: $1,88 \times 2 = 3,76 \text{ м}^3$. Аналогично сжигание этана потребует $0,04 \times 3,5 = 0,14 \text{ м}^3$ кислорода, сжигание бутана – $0,02 \times 6,5 = 0,13 \text{ м}^3$ кислорода и сжигание пропана – $0,04 \times 5 = 0,2 \text{ м}^3$ кислорода [279].

Общее количество кислорода определится суммой:

$$S_1 = 3,76 + 0,14 + 0,13 + 0,2 = 4,23 \text{ м}^3$$

Аналогично формируются уравнения горения тех же компонентов природного газа в озоновой среде:



В результате сопоставления стехиометрических коэффициентов в уравнениях горения в присутствии кислорода и озона, а также суммирования необходимых объемов озона для каждой составляющей природного газа определен общий объем озона:

$$S_2 = 3,76 \times 0,5 + 0,14 \times 2\frac{1}{3} + 0,13 \times 2\frac{1}{3} + 0,2 \times 2\frac{1}{3} = 2,19 \text{ м}^3$$

Легко заметить, что значение S_1 почти в два раза больше S_2 . Принимая о внимание, что S_1 соответствует объему кислорода, а S_2 – объему легко производимого озона, перспективность использования озоновой технологии становится очевидной. Необходимо отметить, что в описанных рассуждениях делалось допущение о содержании в топочной камере чистого озона. В реальных условиях в топочной камере присутствует озono-воздушная смесь, требующая увеличения ее объема. С другой стороны, обычный двухатомный кислород

также принимает участие в горении, что позволяет сделать вывод о снижении объема окислительной смеси [125, 232].

Аналогичный результат получается при сравнении табличных значений окислительно-восстановительных потенциалов для обоих газов (см. таблицу 8 приложения А). Если допустить, что способность к интенсификации горения определяется только окислительно-восстановительным потенциалом, то можно сравнить два соответствующих значения: для кислорода $U_{O_2} = 1,12$ В и для озона $U_{O_3} = 2,17$ В. При таком сравнении мы намеренно допускаем неточность, которая возникает из применения для характеристики горения табличных значений окислительно-восстановительных потенциалов, соответствующих стандартным условиям (температуре 298°К и давлении 1 атм). По превышению значения окислительно-восстановительного потенциала озона аналогичного показателя кислорода в $1,93$ раза сделан вывод о том, что для достижения такого же эффекта количество озона должно быть меньше количества кислорода в $1,93$ раз. В результате деления вычисленного объема кислорода ($4,23$ м³) на $1,93$, определяется требуемое количество озона в объеме $2,19$ м³. Следует отметить, что фактическая интенсифицирующая способность озона оказывается еще выше, что объясняется следующими соображениями [173, 81].

Известно, что скорость химических реакций (в том числе и реакции горения) характеризуется уравнением Аррениуса [294]:

$$K = z e^{-\frac{E}{RT}},$$

где z – стерический фактор, характеризующий зависимость вероятности реакции от ориентации молекул в момент столкновения; E – энергия активации; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура [363]. В результате анализа уравнения Аррениуса и принятия во внимание технологических ограничений сделан вывод о целесообразности повышении скорости реакции за счет снижения энергии активации молекул [214, 367]. Для реализации этого снижения может быть использовано неоднородное электрическое поле, ха-

рактизирующееся высокой напряженностью и охватывающее воздушную среду в области горения. Результатом воздействия поля является образование неравновесного молекулярного газа, молекулы которого находятся в возбужденном, ионизированном состоянии. Рассматриваемое явление наблюдается при соударении ионов и свободных электронов. При этом возникновение этих частиц и определяется внешним электрическим полем [357].

Помимо этого, взаимодействие углеводородов с озоном приводит к образованию реакционно способных (с повышенной окислительной активностью) озонидов, которые представляют собой промежуточные перекисные соединения. Эти озониды довольно быстро разрушаются с выделением атомарного кислорода, который еще более активизирует горение [212].

При температурах выше 100°C существенно возрастает роль атомарного кислорода, образующегося при распаде озона на O_2 и O . Влияние озона на кинетику окисления газа определяется его ролью в инициировании цепной реакции [272]. В присутствии озона эффективная энергия активации окисления газа значительно снижается, что довольно сильно изменяет условия его воспламенения [148, 215]. Это происходит при смещении нижнего предела воспламенения в сторону более низких давлений и температур. Кроме того, в результате ускорения окислительных реакций озон ускоряет распространение пламени в смесях газа с воздухом. Использование озона приводит к уменьшению содержания оксида углерода и к увеличению выхода двуоксида углерода в дымовых газах. Помимо этого в продуктах сгорания отмечается существенное уменьшение токсичных веществ NO и NO_2 . Одновременно полнота сгорания газа увеличивается, а химический недожог уменьшается [64].

В соответствии с формулой Мэйли [212] была произведена оценка энергии, затрачиваемой на получение озона из воздуха при использовании явления барьерного разряда. В качестве примера для водогрейного котла АОГВ-25 с суточной потребностью озона 72 г [354] определена энергия на его получение в течение отопительного сезона в объеме 984 кВт·ч.

3.4.2 Исследование самораспада озона при его транспортировке в топочную камеру

Сжигание газа в озono-воздушной среде ограничивается довольно высокой неустойчивостью озона, вследствие чего не весь его произведенный объем способен достигать области горения. В работах [30, 212] проанализирована динамика самораспада озона, для чего сначала были составлены математические модели процесса в статике, затем (в порядке усложнения) – в динамике, и, наконец, с учетом случайного характера влияния внешних факторов [255].

В качестве исходного условия было принято, что интенсивность C разложения озона связана с его начальной концентрацией N_0 , температурой ϑ , скоростью V и особенностями подачи R [140]:

$$C = f(N_0, \vartheta, V, R). \quad (3.8)$$

С учетом разновременности распада молекул O_3 [342] сформулировано утверждение о том, что скорость распада определяется количеством нераспавшихся молекул. Это количество будем считать постоянной распада и обозначим символом λ . Если в течение интервала dt , времени распадается $\lambda N dt$ молекул, а количество нераспавшихся молекул равно N , то дифференциальное уравнение процесса можно представить в виде [274]:

$$dN = -\lambda N dt. \quad (3.9)$$

По результатам интегрирования из последнего выражения получено:

$$\ln N = -\lambda t + \ln C \text{ или } N = C \exp(-\lambda t).$$

При $N = N_0$ и $t = 0$ рассчитано произвольное постоянное значение C : $N_0 = C$, и, следовательно,

$$N = N_0 \exp(-\lambda t). \quad (3.10)$$

Принимая во внимание продолжительность полураспада Z , сделана запись: $N = \frac{N_0}{2}$.

Следовательно,

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \exp(-\lambda Z), \quad (3.11)$$

Из выражения (3.11) легко получить: $\exp(-\lambda Z)=1/2$ и $Z = (\ln 2)/\lambda \cong 0,693/\lambda$

В то же время $\lambda = (\ln 2)/Z \cong 0,693/Z$. При таком подходе оказывается возможным представление N через Z :

$$N=N_0 \exp(-t \ln 2)/Z. \quad (3.12)$$

Количество dN молекул озона, не подвергнувшихся распаду в течение времени t , но распавшихся за время dt , определяется выражением:

$$-dN=\lambda N_0 \exp(-\lambda t) dt. \quad (3.13)$$

Примем среднюю продолжительность существования таких молекул величине t . Тогда средняя продолжительность существования одной молекулы определяется частным от деления интеграла $\int_0^\infty \lambda N_0 t \exp(-\lambda t) dt$ на исходное число молекул озона N_0 :

$$\tau = \frac{\int_0^\infty \lambda N_0 t \exp(-\lambda t) dt}{N_0} = \frac{1}{\lambda} = \frac{Z}{\ln 2}. \quad (3.14)$$

В результате преобразований с использованием метода наименьших квадратов получена функция:

$$Z=C_2(\vartheta)=5,5 \exp(-0,057\vartheta), \quad (3.15)$$

где ϑ – температура среды, °С.

Известно, что на интенсивность распада озона сильно влияет температура. Например, при температуре -50°C распад происходит за 2169 часов, а при $+250^\circ\text{C}$ – за полторы секунды. Аналитически эта зависимость определяется функцией:

$$Z=C_2(\vartheta)=5,5 \exp(-0,057\vartheta), \quad (3.16)$$

где ϑ – температура среды, °С.

При эксплуатации котла в реальных условиях образование озона происходит при комнатной температуре. При этом температура воздуховода между озонатором и топочной камерой не превышает $100^\circ\text{...}180^\circ\text{C}$. Интерполируя эти данные, можно предположить, что фактическая продолжительность полу-распада составит несколько десятков секунд.

Влияние режимов подачи озона на интенсивности его распада определяется выражением:

$$C_3(V; R) = L_1(A + BV) + L_2 \sum_{i=1}^n F_i \sin \alpha_i, \quad (3.17)$$

где L_1, L_2 — масштабирующие коэффициенты; A, B — конструктивные параметры; V — скорость подачи озono-воздушной смеси; F_i и α_i — совокупная поверхность препятствий и углы их расположения по отношению к направлению движения озона; i и n — номер и количество препятствий.

$$C = L \frac{0,693N}{5,5 \exp(-0,057\vartheta)} + L_1(A + BV) + L_2 \sum_{i=1}^n F_i \sin \alpha_i. \quad (3.18)$$

В результате преобразований, а также с учетом обозначений $x_1=N$, $x_2=\vartheta$, $x_3=V$, $x_4=F$ и $x_5=\alpha$, выражение (3.18) сведется к виду:

$$C = L_3 x_1 \exp(0,057 x_2) + L_1(A + B x_3) + L_2 \sum_{i=1}^n x_{4i} \sin x_{5i}. \quad (3.19)$$

Таким образом, зависимость интенсивности разложения озона от скорости и режима его подачи является функцией пяти переменных x_1, x_2, x_3, x_4 и x_5 . При этом аргументы x_1, x_2, x_3, x_4 влияют на функцию с положительным знаком, а аргумент x_5 является частью периодической подфункции, что определяет периодичность зависимости (3.19).

Поиск параметров, обеспечивающих оптимальное решение выражения (2,19), предложено [30] осуществлять посредством решения следующей системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC}{dx_1} = L_3 \exp(0,057 x_2) = 0 \\ \frac{dC}{dx_2} = L_3 x_1 0,057 \exp(0,057 x_2) = L_4 x_1 \exp(0,057 x_2) = 0 \\ \frac{dC}{dx_3} = B L_1 = 0 \\ \frac{dC}{dx_4} = L_2 \sum_{i=1}^n \sin x_{5i} = 0 \\ \frac{dC}{dx_5} = L_2 \sum_{i=1}^n x_{4i} \cos x_{5i} = 0 \end{array} \right. . \quad (3.20)$$

При этом $0 \leq x_5 \leq \pi$

Таким образом,

– Минимизация разложения озона при его подаче от озонатора в топочную камеру оказывает существенное влияние на эффективность процесса.

- Оценка динамики разложения озона может производиться на основе дифференциальных уравнений в функции времени.
- Скорость разложения озона зависит от интенсивности его транспортировки, наличия и характера неровностей, а также других препятствий внутри воздуховода, от температуры и концентрации озона в камере сгорания.

3.4.3 Обоснование использования электронно-ионной технологии для подачи озона в топочную камеру

Подача озона в топочную камеру должна соответствовать ряду технических, экономических и экологических требованиям, а также требованиям производственной безопасности [259]. Технические требования формируются, в первую очередь, сочетанием требуемой производительности, мощности озонатора, условий горения и размеров топочной камеры.

Оценка экономической эффективности вполне объективно осуществляется по приведенным затратам, которые позволяют одновременно учесть стоимость переоснащения котельного оборудования и эксплуатационные издержки [264]. С технической точки зрения минимизация приведенных затрат означает удешевление материальной части и снижение затрат на обслуживание. Вследствие отсутствия постоянного контроля за водогрейными котлами малой мощности основная доля эксплуатационных издержек по озono-воздушному наддуву будут сводиться к энергетическим затратам. При отсутствии принудительного движения смеси процесс наполнения топочной камеры озоном происходит крайне медленно. В таких условиях разложение озона может произойти быстрее его попадания топку, вследствие чего озono-воздушный наддув становится бесполезным. Принудительное движение смеси посредством механических вентиляторов экономически не вполне оправдано, а сами вентиляторы могут создавать акустические помехи и требуют технического обслуживания.

Экологические требования в основном определяются недопущением утечки озона в атмосферу. Не вызывает сомнения, что определенная часть ис-

пользуемого озона не участвует в окислительном процессе и удаляется через вытяжную трубу. Вместе с тем отрицательные последствия этого явления легко устраняются надежной герметизацией нижней части дымовой трубы и тщательной настройкой озонатора.

Эффективной мерой, обеспечивающей удовлетворение перечисленным требованиям, может стать вынужденное движение озono-воздушной смеси без использования лопастных вентиляторов [74, 111]. Для решения этой задачи достижения необходимо:

- создать условия использования в качестве побудителя движения озono-воздушной смеси от озонатора в топочную камеру электрического поля;
- сформировать математические выражения, позволяющие рассчитать параметры устройства для электростатической подачи озono-воздушной смеси;
- определить динамические свойства озono-воздушного наддува и сформировать алгоритм управления процессом;

Таким образом, для подачи окислителя в топочную камеру предложено использовать энергию электрического поля, воздействующего на ионизированные молекулы озono-воздушной смеси. [75, 48]. В нашем случае наиболее приемлемым способом ионизации окислителя является электрокоронный разряд. Необходимым условием электрокоронного разряда является малая кривизна электродов, достигаемая при использовании тонкой проволоки или игл.

При достаточно высоком напряжении между такими электродами возникает электрический разряд, сопровождающийся образованием светящегося слоя. Увеличение напряжения приводит к возрастанию разрядного тока и расширению светящейся области. Примечательно, что при постоянном напряжении коронируют электроды обеих полярностей. При переменном напряжении короны чередуются с преобладанием в области с большей кривизной [202].

При дальнейшем увеличении кривизны электродов электрическое поле в коронном разряде становится неоднородным. По мере приближения к электроду с цилиндрической поверхностью напряженность поля увеличивается обратно пропорционально расстоянию до центра кривизны:

$$E = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (3.21)$$

где U – напряжение между электродами; R_2 и R_1 – радиусы электродов.

С другой стороны, напряженность электрического поля, соответствующая условиям ударной ионизации, определяется эмпирической формулой Пика:

$$E_i = 3,04 \cdot \left(\delta + 0,0311 \sqrt{\frac{\delta}{R_1}} \right) \cdot 10^6, \quad (3.22)$$

где δ – относительная плотность воздуха (по отношению к плотности при $\rho_0 = 1.29 \text{ кг/м}^3$); R_1 – радиус коронирующего электрода.

Используя выражения (3.21) и (3.22) в работе [212] автором сформировано аналитическое выражение для определения критического напряжения для возникновения коронного разряда:

$$U_i = 3,04 \cdot 10^6 \left(\delta - 0,0311 \sqrt{\frac{\delta}{R_1}} \right) \cdot R_1 \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}. \quad (3.23)$$

Принимая во внимание формулу Дейча для линейной плотности тока:

$$i = \frac{\delta \pi \varepsilon_0 k U (U - U_i)}{R_2 \ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (3.24)$$

где k – подвижность ионов (например, для отрицательных ионов кислорода при нормальных условиях $k = 1,84 \cdot 10^{-4}$), получена зависимость потока аэроионов к единице длины цилиндрического электрода:

$$N = \frac{i}{e} = \frac{k U (U - U_i)}{7,2 \cdot 10^{-11} R_2 \ln \frac{R_2}{R_1}}. \quad (3.25)$$

По формуле (3.25) сделан вывод о возможности простого управления ионизацией изменением величины подаваемого напряжения.

Отметим, что приведенные рассуждения касались воздуха и подвижности его заряженных частиц. Для распространения полученных результатов на

озоно-воздушную смесь можно использовать значения потенциалов ионизации [228, 74]. Эти величины характеризуют минимальные разности потенциалов, при которых происходит ионизация частиц. В таблицу 8 приложения А сведены значения потенциалов ионизации, входящих в состав воздуха газов, а также озона [238].

При сравнении представленных потенциалов ионизации выявляется их высокое сходство. Это позволяет сделать вывод об эффективности ионизации озоно-воздушной смеси с последующей ее подачей в область горения с помощью электростатического побудителя, исключая применение механических вентиляторов [261]. Подытоживая вышеприведенные рассуждения, можно сделать следующие выводы:

1. При проектировании движителей ионов озона следует принимать во внимание отношение радиусов электродов, величину прикладываемого к ним напряжения и коэффициент подвижности ионов.

2. При увеличении начальной скорости ионов плотность тока увеличивается. По мере удаления ионов от анода наблюдается уменьшение плотности зарядов.

3. Электростатический движитель должен обеспечивать максимальную скорость движения ионов озона на выходе из ускоряющего электрода.

3.4.4 Управление концентрацией озоно-воздушной смеси в камере сгорания водогрейных котлов

Необходимость управления концентрацией озоно-воздушной смеси определяется неоднозначностью ее влияния на эффективность горения газа. С одной стороны, заниженная концентрация не позволяет достичь требуемой интенсификации горения. В то же время, завышенная концентрация также приводит к негативному результату: неиспользованная часть окислителя удаляется в окружающую среду вместе с продуктами сгорания и вызывает ускоренную коррозию металлических элементов конструкции котла. Кроме того,

завышенная концентрация озono-воздушной смеси требует принятия дополнительных мер по защите персонала.

Процесс горения всегда находится под влиянием внешних возмущающих факторов: стадии горения, химического состава газа, атмосферного давления, температуры, режимов удаления продуктов сгорания и т.д. Эти факторы влияют на расход озono-воздушной смеси, что определяет необходимость корректировки интенсивности работы генератора озона.

Разработке автоматического управляющего устройства предшествует обоснование принципа формирования управляющего воздействия [296]. В работах [212, 237, 48] обосновано исключение разомкнутого принципа управления, а также управления «по возмущению». При реализации принципа управления «по отклонению», возможно кратковременное отклонение концентрации озона от требуемого уровня. Однако вслед за этим отклонением следует корректировка режима работы озонатора по результатам сравнения заданной и фактической концентрации озона [92]. На рисунке 3.8 представлена функциональная схема системы управления концентрацией озона.

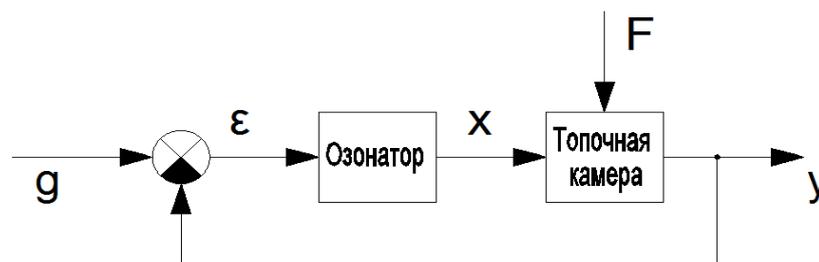


Рисунок 3.8 – Функциональная схема системы управления концентрацией озона

На функциональной схеме приняты следующие обозначения: g – задающее воздействие; y – управляемая величина (фактическая концентрация озона), F – возмущающее воздействие; ε – ошибка управления, $\varepsilon = g - y$; x – управляющее воздействие (подача озона в камеру сгорания).

Перечисленные факторы, их соотношение и аккумулирующие свойства камеры сгорания оказывают влияние на концентрацию озono-воздушной смеси. Экспериментальные исследования этого процесса являются достаточно сложными. Помимо этого, параметры процесса у разных котлов существенно различаются. Для реализации общего подхода к описанию динамики концентрации озono-воздушной смеси в работе [212] сформированы технические принципы разработки широкого круга систем автоматического управления для разномошностных водогрейных котлов.

Вследствие инерционности процессов подачи и расхода озono-воздушной смеси в их математическом представлении присутствует координата времени. Уравнение баланса озono-воздушной смеси в топочной камере записано в виде:

$$xdt = \rho dy + kydt, \quad (3.26)$$

где ρ – плотность озона; k – коэффициент пропорциональности.

В соответствии с уравнением (3.26) подача озона x приводит к увеличению его концентрации ρdy и обеспечивает интенсификацию горения xdt . После деления всех членов уравнения на dt получено:

$$\rho \frac{dy}{dt} + ky \frac{dt}{dt} = x \frac{dt}{dt} \quad ; \quad (3.27)$$

$$\rho \frac{dy}{dt} = x - ky. \quad (3.28)$$

В дальнейших рассуждениях будем считать, что концентрация озона «у» является произведением двух функций «u» и «v»: $y = uv$. Тогда производная этого произведения будет записываться как $y' = u'v + v'u$. В результате подстановки функции y' в выражение (3.28), получено:

$$\rho(u'v + v'u) = x - kuv \quad (3.29)$$

В результате несложных преобразований [212] получено:

$$y = \frac{x}{k} + \frac{C}{e^{\frac{k}{\rho}t}}, \quad (3.30)$$

где C – постоянная интегрирования

Выражение (3.30) представляет собой функцию концентрации озон-воздушной смеси от интенсивности ее расхода и времени. Из выражения (3.30) следует, что изменение концентрации озона происходит монотонно, достигая установившегося значения при $t \rightarrow \infty$. В связи с этим процесс изменения концентрации может быть описан апериодическим звеном первого порядка:

$$W(p) = \frac{K}{Tp + 1}, \quad (3.31)$$

где k – коэффициент передачи; p – T – постоянная времени.

С целью достижения устойчивой работы системы автоматического управления концентрацией озон-воздушной смеси с заданными показателями качества рекомендовано управляющее устройство, реализующее пропорционально-дифференциальный (ПД), пропорционально-интегральный (ПИ) или пропорционально-интегрально-квадрат-интегральный (ПИИ²) законы управления [275]. При необходимости достижения качества работы системы, соответствующему допустимому значению коэффициента ошибки в установившемся режиме следует остановить выбор на ПД-законе, при ошибке по скорости – ПИ-закон и при ошибке по ускорению – ПИИ²-закон [278].

Следует принимать во внимание, что выбранный закон управления относится ко всему управляющему устройству, представленному на функциональной схеме рисунке 3.9 блоком «Озонатор». Обобщая вышеизложенные рассуждения можно сделать следующие выводы [92]:

1. Управление концентрацией озона в топочной камере газового водогрейного котла является необходимой мерой для достижения благоприятных условий интенсификации горения с целью удовлетворения требованиям экологических и санитарных норм.

2. Аккумулирующие свойства топочной камеры, а также специфика подачи и разложения озона определяют инерционный характер процесса изменения концентрации озона в области горения.

3. Для математического описания процесса изменения концентрации озона в топочной камере происходящие процессы следует рассматривать в функции времени. При этом необходимо учесть, что изменение концентрации озона подчиняется экспоненциальному закону и под действием внешних факторов завершается достижением установившегося значения.

4. Эффективное управление концентрацией озона может осуществляться по замкнутому принципу с формированием управляющего воздействия «по отклонению». При этом на управляющее устройство приходится пропорционально-дифференциальный или пропорционально-интегральный алгоритм.

3.4.5 Динамика изменения концентрации озono-воздушной смеси в топочной камере

Разработка котлов с озono-воздушным наддувом производится при наличии информации о значениях установившейся концентрации озono-воздушной смеси в топочной камере. Помимо этого необходимо располагать данными о динамике изменения концентрации озона при различных режимах горения. Это открывает возможность эффективного управления горением посредством сбалансированного сочетания производительности наддува озono-воздушной смеси, ее концентрации и расхода. При этом инерционность процесса может быть описана дифференциальными уравнениями, графиками переходных или весовых функций, а также частотными характеристиками. Кроме того, своеобразие процесса определяется сложной взаимосвязью поступления озона в область горения и его расходом. При подаче озono-воздушной смеси горение интенсифицируется, но интенсифицированное горение нуждается в большем количестве окислителя. Вследствие этого ограниченная подача озono-воздушной смеси может не привести к желаемому результату или стать причиной возникновения колебаний пламени.

В работе [212] сделано допущение о линейной связи объемов полученного и разложившегося озона с количеством существующих в данный момент

молекул. В таком случае для описания динамики процесса предложено использовать систему дифференциальных уравнений [265]:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = kN - k_1Nx \\ \frac{dx}{dt} = k_2N \end{cases}, \quad (3.32)$$

где N и x – синтезируемое и требуемое количество молекул озона; k, k_1 и k_2 – коэффициенты пропорциональности. Правая часть первого уравнения системы (3.32) определяет разность скоростей образования озона kN и его разложения k_1Nx . В этом уравнении линейная функция от количества образовавшихся молекул определяется уменьшаемым, а линейная функция от произведения этого количества и требуемого количества молекул – вычитаемым.

В результате преобразований получено:

$$\frac{dNdt}{dtdx} = \frac{kN}{k_2N} - \frac{k_1Nx}{k_2N} \quad \text{или} \quad \frac{dN}{dx} = \frac{k}{k_2} - \frac{k_1}{k_2}x \quad (3.33)$$

Интегрированием выражения (2.33) определено количество молекул N :

$$N = \frac{k}{k_2}x - \frac{k_1}{2k_2}x^2 + C_1. \quad (3.34)$$

Между величинами N и x найдена связь с учетом начальных условий: $x = 0$ при $N = 0$. Откуда $C_1 = 0$ и

$$N = M \left(1 - th^2 \frac{kt}{2} \right) \quad \text{или} \quad N = \frac{M}{ch^2(kt/2)}. \quad (3.35)$$

Из выражения (3.35) следует, что при озоновой интенсификации количество молекул озона в зоне горения сначала растет до максимального значения M , а затем снижается до нуля, поскольку интенсифицированное горение нуждается в большем количестве озона (см. рисунок 5 приложения Б). Отметим, что функция (2.35) является четной и характеризуется экстремумом при $t = 0$. Варьируя коэффициентами k , k_1 и k_2 , а также периодически останавливая подачу озона, можно добиться существенного повышения энергетической эффективности процесса [301, 175]. В практических условиях варьирование коэффициентами k_1 , k_2 , и k_3 , возможно в ограниченном диапазоне, опреде-

ляемом конструктивными параметрами озонатора, топочной камеры или воздуховода. Тем не менее, использование импульсного режима открывает возможность повышения концентрации озono-воздушной смеси. Здесь уместна аналогия изучаемого процесса с некоторыми другими физическими явлениями. Например, аналогия с подачей теплоносителя в систему отопления в осциллирующем режиме, с импульсным режимом зарядки химического аккумулятора, и рядк других. Эти процессы могут существенно отличаться по физической сущности, однако характеризуются рядом общих свойств. Для достижения положительного эффекта от импульсного воздействия необходимо определить его количественные характеристики, из которых наиболее важной является частота. При этом частота внешних воздействий взаимосвязана как с их амплитудой, так и с аккумулирующими свойствами камеры.

Таким образом, процесс изменения концентрации озono-воздушной смеси в камере сгорания оказывается весьма схожим с изменением управляемой величины в замкнутой автоколебательной аддитивной системе. При этом расчет параметров автоколебаний в такой системе может производиться либо методом гармонической линеаризации с привлечением преобразования Лапласа, либо на языке дискретных преобразований.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы

1. При описании взаимосвязи количества подаваемого и расходуемого озона при горении газа в озono-воздушной среде следует учитывать динамику процесса и использовать уравнения в дифференциальной форме.
2. Интенсифицирующий эффект и концентрация озono-воздушной смеси находятся во взаимосвязи.
3. При увеличении подачи озono-воздушной смеси в топочную камеру происходит усиление интенсифицирующего эффекта с последующим его снижением.
4. Для достижения максимальной концентрации озонл-воздушной смеси при минимуме энергетических затратах подача озона должна осуществляться в импульсном режиме.

3.4.6 Математическое описание импульсного режима подачи озono-воздушной смеси

При проведении экспериментальных исследований воздействия озона на эффективность горения было отмечено, что наилучший результат достигается при подаче озono-воздушной смеси в импульсном режиме. За счет влияния озона амплитуда пламени при горении углеводородного топлива увеличивается примерно на 20...25%. Примечательно, что рост амплитуды является кратковременным и несколько запаздывающим к коммутации цепи питания озонатора. При этом график зависимости амплитуды пламени от времени соответствует аperiodической кривой второго порядка. После достижения максимального значения амплитуда пламени вновь уменьшается примерно по такой же траектории. Отмечено, что характер изменения амплитуды зависит от конструкции камеры сгорания и режимов коммутации озонатора [212].

Из этого следует вывод о необходимости совпадения собственных параметров камеры сгорания с частотой подачи питания, что характерно для систем с реактивными элементами или систем, содержащих инерционные и нелинейные статические звенья. В обоих случаях для исследования таких систем требуются соответствующие математические описания процесса. Математическое описание производилось в дискретно-разностной форме, а также с применением преобразований Теллера-Боксера [79, 103, 101]. В процессе моделирования подача озono-воздушной смеси рассматривалось как совокупность импульсов прямоугольной формы, поступающих на вход дискретно-нелинейной системы, а амплитуда пламени – как выходная величина. Передаточная функция системы определялась произведением:

$$W_{\text{сист}} = W_{\text{имп}} \times W_{\text{лин}} \quad , \quad (3.36)$$

где $W_{\text{имп}}$ – передаточная функция входного воздействия; $W_{\text{лин}}$ – передаточная функция линейной части системы [282].

В таком случае линейная часть иллюстрируется нарастающей и зеркально убывающей величиной в соответствии с аperiodическим законом второго порядка) $W_{\text{лин}}$:

При этом передаточная функция прямоугольного импульса записывается в виде: $W_{\text{имп}}(w) = \frac{BT_k}{a} \times \frac{2+3w+w^2}{w}$ где B , a – амплитуда и длительность импульса соответственно; T_k – период квантования. Поскольку рассматриваемая система является дискретно-нелинейной, математическое описание ее линейной части также должно быть представлено на языке дискретных преобразований. Для представления передаточной функции линейной части в дискретной форме все ее компоненты были поделены на оператор Лапласа в старшей степени. Впоследствии для каждой дроби вида $\frac{1}{p}$ и $\frac{1}{p^2}$ были определены их эквиваленты на языке w :

$$W_{\text{лин}}(p) = \frac{K_{\text{лин.}}}{T_{2\text{лин.}}p^2 + T_{1\text{лин.}}p + 1} = \frac{K_{\text{лин.}} \frac{1}{p^2}}{T_{2\text{лин.}} + T_{1\text{лин.}} \frac{1}{p} + \frac{1}{p^2}}$$

$$\frac{1}{p} \rightarrow \frac{T_k}{2} \times \frac{1}{w}$$

$$\frac{1}{p^2} \rightarrow \frac{T_k}{12} \times \frac{1-w^2}{w^2}$$

Тогда

$$W_{\text{сист.}}(w) = \frac{k \frac{T_k(1-2w^2)}{12w^2}}{T_{2\text{лин.}} + T_{1\text{лин.}} \frac{T_k}{2} \times \frac{1}{w} + \frac{T_k}{12} \times \frac{1-w^2}{w^2}} = \frac{kB^2T_k(-2w^6 - 12w^5 - 25w^4 - 18w^3 + 5w^2 - 4)}{(2T_{2\text{лин.}} - 4T_k^2)w^3 + 12T_{1\text{лин.}}w^2 + 2T_k^2w} \quad (3.37)$$

Таким образом, для математического описания интенсифицирующего эффекта может быть использована передаточная функция (3.37) по которой при известных постоянных времени и коэффициентах передачи, в соответствие с обратным преобразованием Теллера-Боксера, легко определяются периоды квантования.

Таким образом, можно заключить:

– для исключения механических вентиляторов при подаче озono-воздушной смеси в топочную камеру целесообразно использовать эффект взаимодействия электрического поля с ионизированными молекулами озона. При этом относительно низкий потенциал ионизации озона сопутствует минимальным затратам электрической энергии.

– в результате анализа динамики изменения концентрации озono-воздушной смеси установлено, что в процессе горения исследуемая величина изменяется по экспоненциальному закону. Для описания динамики процесса целесообразно использовать дифференциальное уравнение (передаточную функцию) первого порядка. Принимая во внимание величину допустимого коэффициента ошибки в установившемся режиме, а также требования к помехозащищенности системы, сделан вывод об эффективности применения пропорционально-интегрального закона управления.

– анализ динамики изменения концентрации озono-воздушной смеси с учетом явления самораспада озона показал, что с увеличением подачи озона сначала происходит рост концентрации до достижения максимального значения, а затем ее спад; повышение эффективности использования озона может быть достигнуто при подаче озono-воздушной смеси в импульсном режиме. Для математического описания процесса импульсной подачи озono-воздушной смеси следует использовать язык дискретных преобразований.

3.4.7 Экспериментальные исследования горения в озонированной среде

Экспериментальными исследованиями было подтверждено интенсифицирующее действие озono-воздушной смеси на процесс горения, а также определены параметры, обеспечивающие максимальный эффект. Своеобразие эксперимента заключалось во взаимной зависимости исследуемых факторов. Рост концентрации озono-воздушной смеси приводит к интенсификации горения, однако интенсифицированное горение нуждается в увеличенном объеме окислителя. Очевидно, что для достижения стабильного интенсифицирующего эффекта процессом горения необходимо управлять. При этом наиболее про-

стой способ управления достигается посредством изменения напряжения на электродах озонатора, а также изменения частоты его включения. Однако при отсутствии количественных характеристик процесса разработка замкнутых систем управления оказывается затруднительной. В связи с этим, результаты экспериментальных исследований влияния напряжения и частоты на интенсивность горения позволят сформировать алгоритм и параметры настройки устройства управления озонатором.

Эксперимент проводился на лабораторной установке, в которой топочная камера имитировалась физической моделью, выполненной из прозрачного органического стекла. В качестве предмета горения использовались восковые свечи со свободной длиной фитиля 1 см.

Функциональная схема лабораторной установки представлена на рисунке 6 приложения В. Установка состоит из имитационной топочной камеры 1, озонатора 2, нагнетателя воздуха 3 и блока питания 4. Имитационная камера имеет форму параллелепипеда с размерами 500×300×400 мм. Озонатором служило лабораторное устройство типа TOG-B2. Ввиду отсутствия собственного насоса озонатор дополнялся бытовым электрофеном. При проведении эксперимента атмосферный воздух подавался в межэлектродное пространство озонатора, откуда готовая озono-воздушная смесь нагнеталась в область горения.

Производительность озонатора существенно зависит от величины напряжения, подаваемого на коронирующие электроды [301]. Во избежание технических трудностей при варьировании высоким напряжением напряжение на первичной обмотке повышающего трансформатора TV2 (ЛАТР-2М) изменялось в диапазоне от 200 до 230 В и измерялось вольтметром PV электромагнитной системы (Д5082, кл. точности 0,2, пределы изм. 0 – 300 В). Для реализации импульсного режима использовалась ручная коммутация посредством кнопки SB. При проведении эксперимента частота принималась равной 0; 0,5; 1,0 и 2,0 Гц. Для оценки интенсивности горения измерялась амплитуда пламени с помощью линейки 5. Фотография экспериментальной установки пред-

ставлена на рисунке 7 приложения В. Эксперимент проводился в трехкратной повторности. Результаты эксперимента сведены в таблицу 9 приложения А.

Первичная обработка экспериментального массива свелась к вычислению средних опытных значений по группам при различных напряжениях питания и частотах включения озонатора [244]:

$$\overline{Y_{x_2}} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 Y_{x_{2j}}, \quad (3.38)$$

где $Y_{x_{1i}}$ и $Y_{x_{2i}}$ – амплитуды пламени при соответствующих значениях факторов, а также общих средних значений результатов измерений, см:

$$\overline{Y} = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{x_{ij}}, \quad (3.39)$$

где $Y_{x_{ij}}$ – текущие значения амплитуды пламени, см.

Результаты вычислений, а также значения дисперсий сведены в таблицу 10 приложения А. Далее рассчитывались средние изменчивости, определяемые варьированием исследуемых факторов:

$$\sigma_{X_1}^2 = \frac{4}{16} \sum_{i=1}^4 (\overline{Y_{x_{1i}}} - \overline{Y})^2 = 0,88 \text{ и } \sigma_{X_2}^2 = \frac{4}{16} \sum_{j=1}^4 (\overline{Y_{x_{2j}}} - \overline{Y})^2 = 3,1. \quad (3.40)$$

В результате появилась возможность определения общей изменчивости по обоим факторам, а также случайной изменчивости [286]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (Y_{x_{ij}} - \overline{Y})^2 = 4,16 \text{ и } \sigma_0^2 = \sigma^2 - \sigma_{X_1}^2 - \sigma_{X_2}^2 = 0,19. \quad (3.41)$$

Оценка влияния изменений факторов X_1 и X_2 на величину Y производилась по критерию Фишера. По величинам степеней свободы $k=3$ и $l=9$ для фактора X_1 определялось табличное значение $F^{\text{таб}}=3,86$, а затем это значение сравнивалось с расчетной величиной $F_{X_1} = \frac{\sigma_{X_1}^2}{\sigma_0^2} = 4,7$ [202]. Выполнение неравенства $F_{X_1} > F^{\text{таб}}$ свидетельствует о статистически значимом влиянии напряжения питания озонатора на изменение амплитуды пламени. Для количественной оценки меры влияния определялся коэффициент детерминации $r_{X_1}^2 = \frac{\sigma_{X_1}^2}{\sigma^2} = 0,21$. Для фактора X_2 в той же последовательности при $k=3$ и $l=9$ рассчитывалось таб-

личное значение, которое сопоставлялось с расчетной величиной: $F_{X_2} = \frac{\sigma_{X_2}^2}{\sigma_0^2} = 16,5$. После проверки соответствия результатов расчета неравенству $F_{X_2} > F^{\text{таб}}$, определялось статистически значимое влияние частоты и оценивался коэффициент детерминации $r_{X_2}^2 = \frac{\sigma_{X_2}^2}{\sigma^2} = 0,74$.

Неполная квадратичная регрессионная модель строилась по матрице с равномерным дублированием. При этом источником построения послужили результаты полного факторного эксперимента 2^2 (таблица 11 приложения А). Далее рассчитывалась построчная дисперсия для каждого опыта:

$$S_{y_u}^2 = \frac{\sum_{g=1}^{n_u} (y_{ug} - \bar{y}_u)^2}{f_u}, \quad (3.42)$$

где, f_u – число степеней свободы в u -м опыте при определении u -й построчной дисперсии $S_{y_u}^2$; $f_u = n_u - 1$; g и n_u – номер и количество дублей эксперимента соответственно; y_{ug} – результат g -го повторения u -го эксперимента; \bar{y}_u – среднее арифметическое значение всех дублей u -го эксперимента, $f_u = 3 - 1$

Вследствие одинакового количества повторений в каждом опыте однородность дисперсий экспериментальных данных определялась по критерию Кохрена: $G_p = \frac{S_{y_{u_{\max}}}^2}{\sum_{u=1}^N S_{y_u}^2} = 0,35$, где N – общее количество опытов; $S_{y_{u_{\max}}}^2$ – максимальная дисперсия. Заключение об однородности дисперсий было сделано на основе соблюдения неравенства $G_{\text{таб}} > G_p$, где $G_{\text{таб}}$ – теоретическое значение критерия Кохрена, найденное по таблицам по $f_u = 2$, $N = 4$ и уровня значимости $\alpha = 0,05$.

Для описания изучаемого процесса использовано уравнение регрессии вида:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_{12}, \quad (3.43)$$

параметрами которого являются: $b_0 = 3,35$; $b_1 = 0,6$; $b_2 = 0,9$; $b_{12} = 0,15$.

Расширенная матрица плана 2^2 представлена в таблице 12 приложения А.

В результате использования критерия Стьюдента было установлено, что все коэффициенты уравнения (3,43), кроме b_{12} являются статистически значимы-

ми. Последнее заключение позволило представить уравнение в виде: $y=3,35+0,6x_1+0,9x_2$. Проверка адекватности модели осуществлялась по критерию Фишера [202]. Численные данные, сведенные в таблицу 13 приложения А, свидетельствуют об удовлетворительном воспроизведении экспериментальных данных. Исследуемая зависимость является линейной и графически в трехмерном пространстве изображается плоскостью (рисунок 6 приложения Б).

По результатам вышеприведенных рассуждений сделаны следующие выводы [212]:

- зависимость интенсивности горения от напряжения питания электроразрядного озонатора, а также от частоты его включения является статистически достоверной;
- коэффициент детерминации на уровне 0,74 определяет сильное влияние на интенсивность горения частоты коммутации цепи питания озонатора; в то же время влияние напряжения питания озонатора на интенсивность горения характеризуется коэффициентом детерминации на уровне 0,21.
- наибольшая эффективность подачи озоно-воздушной смеси в топочную камеру отмечена при коммутации цепи питания озонатора с частотой 1 Гц и напряжении на первичной обмотке повышающего трансформатора 230 В.

Физические закономерности, выявленные при осуществлении научных исследований и описанные в 2.4.1...2.4.6, были учтены при разработке ряда конструкций котлов. При совершенствовании серийных газовых водогрейных котлов принимались во внимание следующие требования [212]:

- возможность обеспечения штатной тепловой производительности без увеличения потребления газа;
- удовлетворение экологическим требованиям по объему и составу продуктов сгорания;
- отсутствие необходимости в постоянном техническом обслуживании;
- независимость от электросети;
- отсутствие выделений окиси углерода и других ядовитых газов;

– отсутствие акустических и вибрационных помех.

Разработка новых конструкций котлов сопровождалась последовательным патентованием технических решений, имеющих признаки технической новизны [182, 308, 311, 310, 314, 316, 318, 320, 337] и внедрением в производство на предприятиях ООО «Термофор», г. Новосибирск и ЗАО «ТеплоГарант», г. Кострома.

3.5 Электрооборудование для ресурсо-энергосбережения в системах водоснабжения объектов АПК

3.5.1 Принцип построения автоматизированных систем коммерческого учета водопотребления

Для обоснования нового способа сбережения водных ресурсов следует обратиться ко второму уравнению совокупности (2.1). В этом случае слагаемые

$k_3 k_5 \cdot \xi \frac{dz_1}{dt}$ и $k_2 \frac{dx}{dt}$ обращаются в нуль. Тогда общее количество доставляемой потребителю воды определится соотношением $M(t) = k_1 k_5 \cdot \xi_2 \frac{d\varphi_2}{dt} + k_6$.

Для питания насоса в водопроводной сети затрачивается энергия $k_1 \frac{d\varphi_2}{dt}$. При этом эффективность насоса определяется создаваемым им напором и расходом воды, характеризующимся коэффициентами k_5 . Использование энергетического коэффициента ξ_2 позволяет пересчитать затраченную энергию на массу поставляемой воды. При возникновении протечек в водопроводной сети или при несанкционированном потреблении воды величина потерь k_6 увеличится. Таким образом, действенной мерой для сбережения водных ресурсов будет оперативное определение величины k_6 и принятие мер для сведения ее к нулю: $k_6 = M(t) - k_1 \frac{d\varphi_2}{dt} k_5 \cdot \xi \rightarrow 0$.

Одной из задач ресурсо-энергосбережения в водоснабжении жилищного, социально-бытового и производственного секторов АПК, решаемой автоматизированной системой коммерческого учета водопотребления (АСКУВ), заключается в обеспечении оперативного контроля за расходом воды в различ-

ных точках водоподающей сети и доставке полученной информации на специализированный сервер [117, 36]. Функциональная схема АСКУВ представлена на рисунке 3.9.

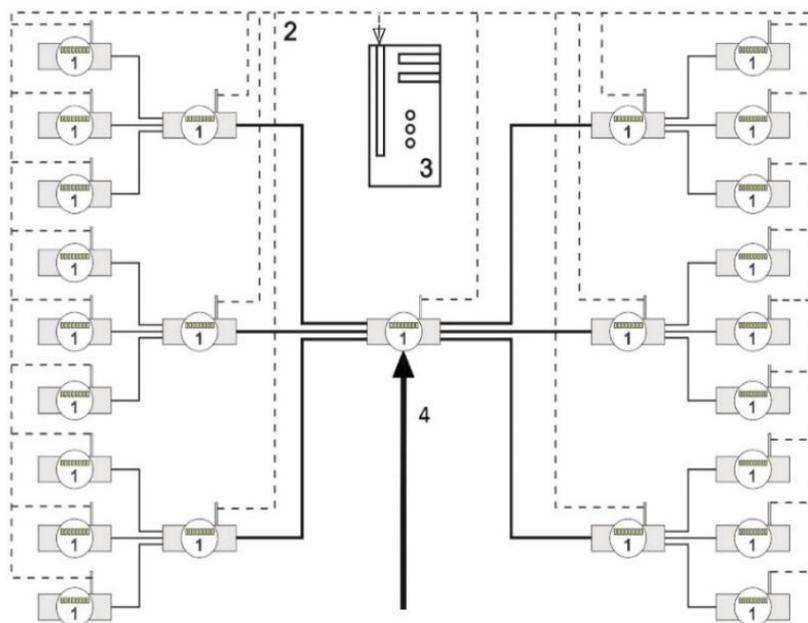


Рисунок 3.9 – Функциональная схема автоматизированной системы коммерческого учета водопотребления

АСКУВ содержит от нескольких десятков до сотен измерительно-передающих устройств (ИПУ) 1, установленных у потребителей и в узловых точках водоподающей сети при наличии нескольких иерархических уровней. Линии связи 2 соединяют ИПУ с удаленным сервером 3. ИПУ осуществляют сбор, первичную обработку и передачу информации о расходах воды на специализированный сервер 3 [35].

Для обеспечения удобства и безопасности эксплуатации электропитание ИПУ должно быть автономным [82]. Для удобства эксплуатации в качестве ИПУ желательно использовать первичные преобразователи генераторного типа [66], например, расходомеры с подвижными элементами. При этом в трубопроводах с диаметром менее 50 мм и потоках воды с $Re < 4000$ наилучшие результаты показывают ротационные расходомеры [292, 328, 340], а в остальных случаях – вихревые. Статические характеристики вихревых расходомеров линейны, а перепад давления на измеряемом участке при их использовании

минимален [276]. Вместе с тем, при использовании кинетической энергии потока, необходимо принимать во внимание нагрузку, которую представляют преобразователи по отношению к водопроводной сети в соответствии с методикой, приведенной в работе [130]. При ощутимой нагрузке следует использовать иные источники энергии [289, 44, 45, 116].

Связь ИПУ со специализированным сервером рекомендовано осуществлять по одноступенчатой или многоступенчатой схеме [207]. При реализации двухступенчатой схемы электромагнитный сигнал в радиочастотном диапазоне передается непосредственно от ИПУ к приемнику сервера. Двухступенчатая схема предполагает передачу сигнала от ИПУ к локальному трансиверу и последующую трансляцию по существующим каналам связи.

В результате действия АСКУВ оказывается возможным:

- сбор информации о текущем расходе воды в заданной точке трубопровода в соответствии с запросом;
- накопление информации о расходе воды, определение водопотребления в течение заданного временного интервала;
- оперативное выявление повреждений трубопроводов и хищений воды;
- проведение дистанционной диагностики состояния элементов водопроводной сети и сигнализации о внештатных режимах;
- автоматическая блокировка частей водопроводной сети;
- передача накопленных данных и результатов их обработки на специализированный сервер;
- визуализация результатов измерения и расчетов в графической и табличной форме;
- формирование и размещение в сети Интернет отчетов по показателям водопотребления;
- реализация многотарифного принципа расчета суммы оплаты за потребленные объемы воды;
- снижение вероятности ошибок при проектировании и реконструкции водопроводных сетей.

Таким образом, применение АСУВ может рассматриваться как эффективный прием ресурсо-энергосбережения при водообеспечении потребителей сельскохозяйственного назначения.

3.5.2 Энергосберегающая технология беспроводной передачи информации в автоматизированных системах коммерческого учета водопотребления

Передача информации посредством проводных линий связи для обслуживания АСКУВ в ряде случаев оказывается неэффективной вследствие уязвимости технических средств к внешним механическим воздействиям, высокой стоимости токопроводящих элементов и экранирующей оболочки, а также обусловленных ими ограничений при проведении агротехнических работ. Наиболее удобным способом передачи информации является радиосвязь [365]. Для осуществления радиосвязи необходима электрическая энергия, ресурсы которой в каждом ИПУ весьма ограничены. Принимая во внимание, что помимо обеспечения питанием передатчика автономные источники энергии ИПУ должны запитывать устройства первичной обработки и накопления информации в работе [207], сделан вывод о необходимости разработки энергосберегающего принципа ведения радиосвязи.

Для достижения энергосбережения при беспроводной передаче информации от ИПУ на сервер предложен новый принцип построения системы связи, заключающийся в ступенчатой транспортировке данных [208]. При реализации этого принципа каждое ИПУ оснащается приемно-передающим устройством, с помощью которого оно передает измеренные значения на ближайшие ИПУ, а также принимает информативные сигналы от других устройств, производит усиление этих сигналов и последующую передачу. Таким образом, каждое ИПУ выполняет две функции: получение информации от «собственного» датчика о контролируемом параметре с передачей ее ближайшим ИПУ, и ретранслирование информативных сигналов от других ИПУ с «чужими» датчиками. Предложенный принцип связи существенно отличается от известного за счет сочетания «ступенчатой» передачи информации между конечными

объектами цепи. Это позволило увеличить разрешающую способность типового передающего оборудования, не повышая несущую частоту связи и существенно снизить энергопотребление.

В работе [207] произведено сравнение характеристик традиционного и предложенного способов организации связи с энергетической точки зрения. На рисунках 8 и 9 приложения В изображены траектории прохождения сигнала при организации связи по этим способам (траектории А и В соответственно). На основании формулы Фриисса [300] доказано, что при оснащении передатчика и приемника сонаправленными антеннами и при использовании электромагнитных волн с одинаковой поляризацией энергетические затраты на передачу информации на одинаковое расстояние могут быть снижены более чем в 2 раза:

$$P_{t1} = \frac{P_r(4\pi)^2 \cdot d^2}{G_t G_r \lambda^2}; P_{t2} = \sum_{i=1}^n \frac{P_r(4\pi)^2 \cdot b_i^2}{G_t G_r \lambda^2}; P_{t3} = \frac{P_r(4\pi)^2 \cdot n \left(\frac{d}{n}\right)^2}{G_t G_r \lambda} = \frac{P_r(4\pi)^2 \cdot \frac{d^2}{n}}{G_t G_r \lambda}.$$

где P_{t1} , P_{t2} и P_{t3} – требуемые мощности сигналов, развиваемые в антеннах передающих устройств при традиционном, ступенчатом и ступенчатом с одинаковой протяженностью каждого участка способах организации связи, Вт; d – расстояние между объектами связи, м; λ – длина волны, м. P_r – минимально допустимая электрическая мощность в приемной антенне, Вт; где i – номер участка цепи; b_i – длина i -го участка, м; n – количество участков; G_r и G_t – коэффициенты усиления приемной и передающей антенны соответственно. В качестве примера для приемных и передающих антенн с круговой диаграммой направленности $G_r = G_t = 1$ и $P_r = 10^{-5}$ Вт; $d = 1000$ м, $\lambda = 0,1$ м и $n = 1 \dots 18$ получен ряд мощностей, которые были представлены графически в функции n на рисунке 7 приложения Б. По этому рисунку можно сделать вывод, что с увеличением количества участков энергозатраты на связь существенно уменьшаются. Очевидно, что ступенчатая траектория на рисунке 8 приложения В иллюстрирует идеализированный случай расположения неподвижных объектов связи. В производственных условиях расположение ИПУ может меняться случайным образом (рисунок 9 приложения В). В таких случаях

суммарная длина всех участков может оказаться больше расстояния между конечными объектами связи, а целесообразность использования ступенчатого принципа оценивается неравенством: $P_{t1} > P_{t2}$.

Преимущества предложенного метода не ограничиваются ступенчатым принципом передачи данных, но также способностью отдельных ИПУ самостоятельно выстраивать траектории прохождения сигналов.

Распространение классических Zig-Bee-технологий в системах водоснабжения объектов АПК ограничивается следующими причинами:

1. Количество объектов связи в системах водоснабжения может многократно превышать объем взаимодействующих элементов в технологиях «умных домов», что требует не всегда возможного повышения несущей частоты.

2. Повышенные требования к автономным источникам электропитания ИПУ, обусловленные неравномерной нагрузкой при обработке различных объемов информации.

Указанные факторы предложено учесть дополнением алгоритма построения траектории движения сигналов операцией поочередного подключения отдельных ИПУ. В модернизированной Zig-Bee-технологии предусмотрено подключение в каждый момент времени только одного ИПУ. При этом все остальные ИПУ сети либо остаются в «спящем» режиме, либо участвуют в приеме и передаче исключительно контрольных сигналов. Поочередное подключение реализуется с помощью ИПУ, выполняющего функции координатора. Модернизированная Zig-Bee-технология сохраняет функции самоорганизации и самовосстановления, однако алгоритм выбора траектории передачи сигнала ограничен жесткими предписаниями номеров стартовых ИПУ. В модернизированной Zig-Bee-технологии каждое ИПУ (кроме первого и последнего) потребляет одинаковое количество энергии. Траектория прохождения сигнала в модернизированной Zig-Bee-технологии иллюстрируется рисунком 3.10. В рассматриваемом примере информационный сигнал передается от ИПУ с номером 1 к ИПУ с номером n . В передаче принимают участие эле-

менты с номерами 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8...и $n - 1$ (рисунок 3.10.а). При выходе из строя ИПУ 3 и 4 сигнал проходит через элементы 2, 9, 10, 5, 6, 7, 8,...и $n - 1$ (рисунок 3.10.б). Изменение режима работы ИПУ 9 и 10 определяется функцией самовосстановления без участия оператора. По окончании передачи информации от ИПУ 1 подключается ИПУ 11 (рисунок 3.10в), за ним – ИПУ 12 (рисунок 3.10г), а затем – последующие ИПУ системы. Ввиду высокой скорости опроса очередность подключения ИПУ не принципиальна. После коммутации периферийных ИПУ следует опрос ИПУ из центральной области, а затем – ИПУ, расположенных рядом с адресатом. Возможна и иная очередность подключения в зависимости от конкретных условий.

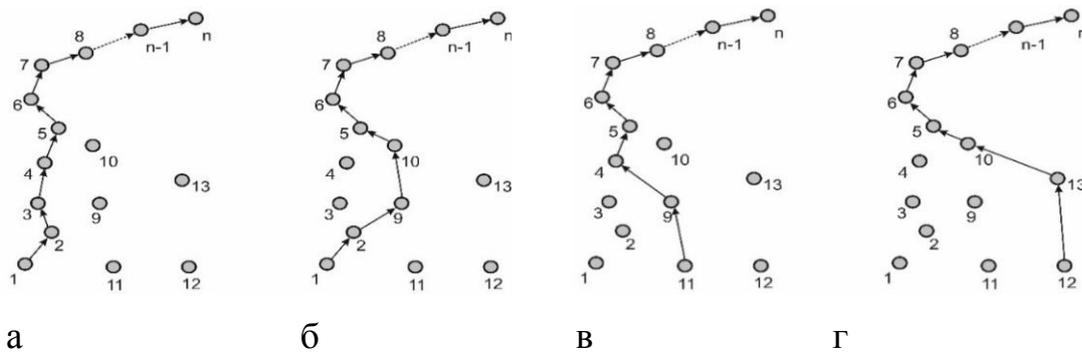


Рисунок 3.11 - Траектории движения сигнала при различных способах передачи

Важным вопросом, требующим решения на этапе проектирования АС-КУВ, является выбор частоты подключения ИПУ. Этот выбор связан с нахождением компромисса между двумя требованиями. С одной стороны, частота коммутации должна быть настолько высокой, чтобы измеряемая величина не успела существенно измениться за время опроса других ИПУ [134]. С другой стороны, повышение частоты сдерживается необходимостью отбраковки результатов измерений, приходящихся на переходные процессы в линии связи при ее коммутации. Кроме того, необходимо принимать во внимание, что от выбора несущей частоты зависит эффективность преобразования аналоговых сигналов с выходов датчиков в цифровую форму [298]. Сигналы, приходящие на входы приемных устройств, представляют собой суммы полезной информации и помех в соответствии с распределением Гаусса. [274]. На основе анализа спектральной плотности шума в работе [207] приведена последова-

тельность оценки эффективности связи на разных частотах, а в работах [37,207] сделан вывод, что при использовании модернизированной Zig-Bee-технологии потребление энергии оказывается значительно меньше, чем в сетях Wi-Fi. Это уменьшение обусловлено ступенчатой передачей сигнала, а также пониженной скоростью обмена информацией [65, 282]. При снижении скорости передачи данных до 250 кбит/с наблюдается повышение надежности связи, однако при этом ее пропускная способность практически не уменьшается вследствие отсутствия звуковых или видео составляющих [350, 245, 180]. Кроме того, длительность перевода Zig-Bee-технических средств из режима ожидания в рабочее состояние совершается в сотни раз быстрее, чем переключение устройств в системах Bluetooth или Wi-Fi.

На примере рисунка 10 приложения В видно, что схемы соединения элементов сети в результате самоорганизации могут иметь различные конфигурации. Структура сети с минимальным энергопотреблением может быть определена по имеющимся данным о размещении ИПУ в пространстве [43].

При передаче данных от четвертого к первому ИПУ необходима десятикратная ретрансляция сигнала (рисунок 10а приложения В.). При этом четвертое ИПУ может располагаться на значительном расстоянии от первого (рисунок 10б приложения В.). По данным таблицы 14 приложения А можно проследить зависимость количества ретрансляций от каждого ИПУ к первому для двух вариантах построения сети. Очевидно, что при учете расположения ИПУ можно добиться еще меньшего расхода энергии, чем при реализации обычной самоорганизующейся сети [21]. При использовании модернизированной системы для сбора информации о влажности почвы и организации локального полива дополнительный выигрыш достигается за счет выполнения соседними ИПУ функций ближайшего неисправного устройства. Например, при неисправном пятом ИПУ (рисунок 10б приложения В) его функции выполняет четвертый и шестой элемент.

Автоматическое определение координат расположения ИПУ может осуществляться посредством спутниковой навигации (GPS, ГЛОНАСС,

DORIS), однако в целях удешевления аппаратуры в работе [207] обоснована целесообразность применения способа, основанного на автоматическом измерении степени затухания амплитуды излучаемого радиосигнала [252]. Примечательно, что помимо энергосберегающего эффекта этот способ не нуждается в синхронизации [368].

Таким образом, предложенная структура позволяет определять расположение и состояние ИПУ, а также предоставлять эту информацию в виде, пригодном для последующей ручной или машинной обработки.

Выводы:

- Для уменьшения затрат энергии на передачу информации по каналам радиосвязи целесообразно применять ее последовательную многозвенную ретрансляцию.
- Эффективное определение расположения ИПУ может производиться посредством автоматического измерения и сравнения амплитуд переданных и принятых контрольных радиосигналов.

3.5.3 Исследование режимов работы пьезоэлектрических преобразователей кинетической энергии водного потока в блоках питания измерительно-передающих устройств

Для питания ИПУ, входящих в состав АСКУВ, рекомендовано использовать вихревые первичные преобразователи кинетической энергии водного потока. Эти устройства обладают невысоким КПД ($\eta=0,1$), но их характеристики не зависят от жесткости и температуры воды [344, 349]. Кроме того, вихревые устройства создают незначительный перепад давления на измеряемом участке и вполне безопасны ввиду отсутствия подвижных элементов. Для преобразования кинетической энергии поступательное движение воды оно должно быть преобразовано в вихревую дорожку Кармана. Это обычно осуществляется посредством объемного обтекателя (квантователя), установленного в трубопроводе перпендикулярно потоку. В качестве воспринимающего органа используются пьезоэлементы, преобразующие пульсирующие механические воздей-

ствия в электрическую энергию. При этом частота вихрей оказывается пропорциональной скорости воды, а скорость срывов – ее расходу. Для повышения энергетической эффективности воспринимающего органа необходимо совершенствовать конструкции обтекателя или воспринимающего органа. Оптимизация обтекателя заключается в определении его геометрических характеристик и координат расположения в трубопроводе. Совершенствование воспринимающих органов сводится к поиску наиболее эффективных конструкций пьезоэлементов, а также конструкций мембран, воспринимающих механические воздействия. Например, в серийном пьезоэлектрическом воспринимающем органе типа 108М, (НПО «ПЬЕЗОЭЛЕКТРИК») восприятие колебаний среды осуществляется лопаткой. Положительный результат может быть достигнут увеличением размеров этой лопатки или размеров пьезоэлемента в его основании. Однако вследствие ограничения поверхности лопатки размерами фронта импульса, эту меру надо использовать с осторожностью.

Поиск наиболее эффективного режима работы вихревых преобразователей был произведен на основе компьютерной модели с последующей проверкой полученных результатов экспериментальными исследованиями [291]. В основу модели был положен метод решетчатых уравнений Больцмана, (LBM, Lattice Boltzmann Method) [57] описывающий моделируемое пространство абстрактной решеткой [263].

Разработанная программа протестирована моделированием течения жидкости в соответствии с условиями Пуазейля, предусматривающим, в том числе, параболический профиль распределения скорости от края трубопровода до его оси [3, 5]. Алгоритм программы представлен в таблице 15 приложения А.

Разработанный алгоритм позволяет производить наблюдение за процессом течения жидкости по трубопроводу при различных препятствиях. При этом у пользователя остается возможность варьирования конструктивными параметрами в широких пределах. Кроме того, двухмерное моделирование течения жидкости может быть использовано при проектировании водопроводных систем.

Специфической особенностью пьезоэлектрических преобразователей является их требования к импульсному режиму воспринимаемых ими механических воздействий. Следовательно, и воздействие водного потока должно быть импульсным. Однако в производственных условиях водный поток представляет собой непрерывно движущуюся массу. И только при изменении расхода воды появляются своеобразные материальные кванты. Аналогичный результат может быть получен при использовании препятствий, обеспечивающих хаотичное движение воды, сопровождающееся микротечениями, «всплесками» и «провалами» в широком частотном диапазоне. В работе [207] предложена методика определения условий наиболее эффективного преобразования кинетической энергии потока в электрическую форму. Для оценки эффективности использована величина генерируемого электрического напряжения $E_э = f(F; \frac{dF}{dt}; N)$, где F – статическая составляющая (величина механического усилия, кг); $\frac{dF}{dt}$ – динамическая составляющая (скорость приложения усилия, кг/с); N – коэффициент, учитывающий конструктивные свойства пьезоэлектрического преобразователя, геометрически е размеры и координаты расположения препятствия.

Принимая во внимание, что площадь взаимодействующего с пьезоэлектрическим преобразователем потока и плотность воды учитываются обобщающим коэффициентом N , для одной пары вихрей можно записать: $E_э = f_1(v_1^2; \frac{dv_1^2}{dt}; N)$, где v_1 – скорость первичного потока.

Таким образом, поиск оптимальных параметров гидроэлектрического преобразователя сводится к определению условий формирования максимальных значений v_1 и $\frac{dv_1}{dt}$. В проведенных исследованиях использовались препятствия, радиусы которых не превышали десятую часть ширины моделируемого пространства.

Полученные результаты позволили сделать следующие утверждения:

- Для увеличения вертикальной составляющей ускорения вторичного потока при использовании препятствий с основаниями в виде круга расстояние между препятствием и воспринимающим органом не должно превышать удвоенную характеристическую длину трубы;
- Уменьшение размеров препятствия и увеличение скорости потока приводит к росту частоты вихреобразования: двухкратное увеличение скорости определяет рост частоты в 1,6 раза, а двухкратное увеличение радиуса основания препятствия уменьшение частоты в 1,4 раза.
- при неизвестных параметрах анализируемого участка трубопровода для достижения максимальной скорости и ускорения вторичного потока расстояние между воспринимающим органом пьезоэлектрического преобразователя и препятствием должно соответствовать 80...110% от характеристической длины трубы;
- При увеличении скорости потока частота срыва вихрей линейно возрастает. При этом увеличение частоты в 1,6 раза свидетельствует о двухкратном ускорении.
- Формирование вихревой дорожки требует некоторого времени после начала движения жидкости.

Для устройств с различными конструктивными параметрами компьютерное моделирование процесса вихреобразования методом решетчатых уравнений дало возможность получить соответствующие значения скорости вторичного потока [302]. Проверка результатов, полученных по модели, осуществлялась экспериментальным образом на специализированном лабораторном стенде (рисунки 11.а, 11.б и 12 приложения В). Лабораторный стенд выполнен в виде настольной конструкции, включающей набор подключенных к водопроводу трубопроводов. Внутри трубопровода установлен пьезоэлектрический преобразователь, реагирующий на переменный изгибающий момент. Конструкция лабораторного стенда позволяла варьировать формой препятствия и расстоянием между ним и пьезоэлектрическим преобразователем. Движение воды по трубопроводам обеспечивалось центробежным насосом, регу-

лировалось поворотным краном и контролировалось по величине расхода ротационным счетчиком и секундомером. К выходу пьезоэлектрического датчика подключался осциллограф с возможностью наблюдения на электронно-лучевом экране текущих значений расхода и соответствующих меток времени.

В процессе исследования производилось варьирование расстоянием между пьезоэлектрическим преобразователем и препятствием и фиксировалась скорость потока. Эффективность энергетических преобразований с помощью электронно-лучевого осциллографа оценивалась по величине ЭДС, образуемой на пьезоэлектрическом преобразователе. Результаты эксперимента, материалы по их обработке и результаты компьютерного моделирования исследуемого процесса опубликованы в работе [207].

По результатам исследований сделаны следующие выводы:

- Максимальная эффективность преобразования кинетической энергии водного потока в электрическую форму происходит при равенстве частоты срыва вихрей и резонансной частоты пьезоэлектрического преобразователя.
- При использовании пьезоэлектрических преобразователей в трубопроводах с внутренним диаметром 100 мм и при малых скоростях потока расстояние между пьезоэлектрическим преобразователем и препятствием должно составлять 80...110 мм

3.5.4 Разработка новых методов энергообеспечения измерительно-передающих устройств в автоматизированных системах коммерческого учета водопотребления

Бесперебойное энергообеспечение ИПУ в автоматизированных системах коммерческого учета водопотребления определяется решением двух задач: преобразованием энергии какого-либо первичного источника и аккумулярованием этой энергии на период отсутствия энергетических пополнений.

Электропитание ИПУ предложено осуществлять посредством преобразования рассеянной электромагнитной энергии промышленного происхождения, заполняющей окружающую среду в диапазоне от миллиметровых до километ-

ровых волн [256]. Источниками этой энергии являются разнообразные устройства, в составе которых присутствуют проводники с протекающим по ним переменным током. В первую очередь, к ним относятся различного рода радиопередающие устройства: радио-телевизионные станции, электронные средства связи, Wi-Fi+роутеры, а также линии электропередач. Многие из этих устройств функционируют непрерывно, а график работы других можно с высокой вероятностью предсказать. В большинстве случаев, независимо от вида модуляции, излучаемые электромагнитные колебания являются совокупностью информативных сигналов и несущей волны. Часть этой энергии без ущерба для цели их основного назначения можно преобразовывать в электрическую форму и использовать для питания.

Основную долю рассеянной электромагнитной энергии составляют колебания коротковолнового и ультракоротковолнового диапазонов. Однако в ряде случаев электромагнитный фон представляет длинноволновый или сверхдлинноволновый диапазон. Например, линии электропередач при частоте 50 Гц излучают электромагнитную энергию с длиной волны 6000 км. Для распространения такой энергии грунт, водоемы, леса и другие объекты не являются препятствиями, поскольку токи проводимости в этих случаях существенно превышают токи смещения [268]. В работе [207] произведена энергетическая оценка преобразования электромагнитных с вертикальной поляризацией с учетом особенностей характеристик длинноволнового диапазона. На рисунке 13а приложения В представлен эскиз вертикальной антенны с заземлением. Резонансная частота четвертьволнового несимметричного вибратора соответствует такой частоте, при которой сопротивление на разъеме ХТ1 активно. Для уменьшения габаритов четвертьволновая вертикальная антенна заменена на Г-образную (рисунок 13б приложения В) или Т-образную (рисунок 13в приложения В). Для приема рассеянной энергии служит вертикальная часть антенны. Горизонтальная часть антенны реализует емкостную нагрузку, обеспечивая условия возникновения резонанса. Увеличение длины горизонтальной части антенны приводит к росту ее эффективности. Для приема рас-

сеянной электромагнитной энергии рекомендовано выдерживать соотношение : $\lambda > \lambda_0$, где λ – длина принимаемой волны, λ_0 – длина волны, соответствующая условию резонанса. Сопротивление антенны Z_a , является комплексным ($Z_a = R + jX$), то есть содержит активную (R) и реактивную (X) части:

$$Z_a = R + jX; R = 1600 \left(\frac{h_a}{\lambda}\right)^2; X = W_a \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi \lambda_0}{\lambda}\right),$$

где W_a – волновое сопротивление антенны ($W_a = 450 \dots 550$ Ом), Ом.

При использовании индуктивности (удлиняющей катушки) в качестве компенсатора емкостного сопротивления схема антенны сводится к виду, представленному на рисунке 14 приложения В.

В работе [207] рассчитана электрическая мощность, передаваемая антенной в нагрузку без учета потерь. Показано, что для достижения максимальной эффективности, определяемой мощностью

$$P_0 = (C/2)^2/R$$

должно соблюдаться равенство активной составляющей сопротивления антенны и входного сопротивления нагрузки: $R_{\text{вх}} = R_a$.

В результате анализа полученных соотношений установлено, что энергия, получаемая в результате преобразования электромагнитного фона, зависит от напряженности поля и длины волны. В качестве примера в работе [207] рассчитана мощность, которую обеспечит энергия, наведенная в антенне электромагнитным фоном на частоте 50 Гц при напряженности 0,01187 мВ/м:

$$P_0 = \frac{0,01187^2 \cdot 6 \cdot 10^{12}}{6400} = 0,79 \text{ Вт.}$$

Используемое в расчете значение напряженности вполне реально для сельскохозяйственного района с удалением от центра 10...15 км. Рассчитанная мощность оказалась соизмеримой с требованиями систем питания многих современных электронных устройств. Вследствие максимального потребления энергии ИПУ в режиме передачи, предложено его включение производить периодически. При этом результаты измерений должны быть накоплены и архивированы. Периодичности режима передачи данных также сопутствует значительная инерционность контролируемых объектов. По результатам ис-

следований было разработано, испытано и запатентовано устройство для дистанционного измерения расхода жидкости, принципиальная электрическая схема блока питания которого представлена на рисунке 15 приложения В. Для оперативного исследования энергетического ресурса местности разработана методика, опубликованная в работе [207].

Таким образом,

– рассеянная электромагнитная энергия промышленного происхождения после соответствующего преобразования может быть использована для питания ИПУ.

– В качестве преобразователя электромагнитной энергии промышленного происхождения целесообразно использовать блок автономного питания, состоящий из антенны, колебательного контура, выпрямителя, стабилизатора и химического накопителя электрической энергии.

– Для оценки потенциального энергоресурса местности необходимо выполнить ее обследование в соответствии с разработанными методическими рекомендациями.

Во избежание обесточивания ИПУ и других слаботочных электронных устройств с автономным питанием традиционно используют химические аккумуляторы. К сожалению продолжительность эксплуатации современных аккумуляторов остается небольшой, а количество эффективных зарядно-разрядных циклов – ограниченным. [167]. Кроме того, на эффективность химических аккумуляторов сильно влияет температура, что сдерживает их использование в производственных условиях. В результате анализа современных средств накопления энергии был сделан вывод о целесообразности использования в блоках питания ИПУ ионисторов [96]. Эти средства отличаются низкой деградацией емкости при большом количестве циклов «заряда-разряда» и характеризуются возможностью накопления и отдачи энергии на большой скорости. Недостаток ионисторов, препятствующий их широкому распространению, заключается в саморазряде. Вследствие саморазряда после длительного бездействия ионисторы могут оказаться полностью разряженными, что не позволяет их рас-

смагивать как надежный накопитель энергии в цепях питания электронных устройств. Во избежание обесточивания ИПУ авторами предложено направлять электрическую энергию, получаемую при преобразовании энергии электромагнитного фона, на подзарядку ионисторов, компенсируя их саморазряд. Экспериментально установлено, что несмотря на низкую плотность используемой энергии, имеющегося объема для компенсации саморазряда вполне достаточно. Особенно эффективно совместное использование двух видов источников: кинетической энергии потока воды и электромагнитного фона. В таком случае основное поступление энергии обусловлено потоком движущейся воды, а вспомогательное (направленное на компенсацию саморазряда ионисторов) – рассеянной электромагнитной энергией промышленного происхождения. Вероятность бесперебойного питания ИПУ существенно повышается, а устройство, реализующее новый способ, остается достаточно простым. В работе [87] произведен анализ саморазряда ионистора и сопоставление параметров этого процесса с динамикой поступления энергии при преобразовании энергии электромагнитного фона. На основании этих исследований сделан вывод, что рассматриваемые энергетические потоки вполне сопоставимы, и при напряжении питания 5 В и емкости ионистора 15000 Ф компенсация саморазряда достигается при напряженности электрического поля 160 В/м.

Для оценки количества энергии, доставленной потребителю мощностью P в течение времени t , воспользуемся выражением: $W = P \cdot t$. При этом энергия, накапливаемая ионистором, определяется формулой: $W = \frac{CU^2}{2}$, где C – емкость ионистора; U – напряжение на обкладках ионистора. В процессе разряда ионистора напряжение на его зажимах уменьшается с U_{max} до U_{min} . В связи с этим фактически использованная часть энергии представляет собой разность между полной энергией, сосредоточенной в ионисторе при $U = U_{max}$, и энергией, оставшейся в нем по окончании разряда при $U = U_{min}$. Таким образом,

если $W_{полн.} = \frac{CU_{max}^2}{2}$, и $W_{ост.} = \frac{CU_{min}^2}{2}$, то

$$W_{исп.} = \frac{C(U_{max}^2 - U_{min}^2)}{2}$$

Величина емкости ионистора, необходимая для накопления энергии, определена из соотношения: $C = \frac{2W}{U_{max}^2 - U_{min}^2} = \frac{2Pt}{U_{max}^2 - U_{min}^2}$. С целью увеличения запасенной энергии необходимо либо увеличить U_{max} , либо уменьшить U_{min} . Однако значительное увеличение U_{max} сдерживается техническими ограничениями, связанными с вероятностью пробоя ионистора. В то же время чрезмерное уменьшение U_{min} недопустимо из-за соответствующих требований потребителя. Если принять во внимание, что полная энергия, запасаемая ионистором, составляет 100%, то доля использованной энергии может быть оценена соотношением:

$$X = \frac{100 \cdot W_{исп}}{W_{полн}} = \frac{100 \cdot (CU_{max}^2 - CU_{min}^2) \cdot 2}{2CU_{max}^2} = \frac{100 \cdot (U_{max}^2 - U_{min}^2)}{U_{max}^2}, \% \quad (3.44)$$

Выразив U_{min} в выражении (3.44) через U_{max} , и введя обозначение $k = \frac{U_{max}}{U_{min}}$, получено:

$$X = \frac{100 \cdot (U_{max}^2 - \frac{U_{max}^2}{k})}{U_{max}^2} = \frac{100 \cdot U_{max}^2 - \frac{100}{k} \cdot U_{max}^2}{U_{max}^2} = 100 - \frac{100}{k} \quad (3.45)$$

Из выражения (3.45) следует, что процентная доля энергии, используемой ионистором, зависит от соотношения напряжений. Задаваясь рядом значений $k = \frac{U_{max}}{U_{min}}$, построен график зависимости доли используемой энергии ионистором в отношении U_{max} и U_{min} (рисунок 9 приложения Б). По графику можно сделать вывод, что если U_{max} в два раза превышает U_{min} , то использованию подлежат 50% запасенной энергии. Если же это превышение окажется двадцатикратным, то доля используемой энергии достигнет 95%. Для обеспечения постоянства напряжения на нагрузке к ионистору традиционно подключают стабилитрон (или иной полупроводниковый элемент), внутреннее сопротивление R_q которого изменяется при изменении условий работы. В таком случае цепь разряда ионистора представляется схемой замещения, изображенной на рисунке 16 приложения В.

В работе [207] произведено теоретическое исследование разряда ионистора на активную нагрузку и определены значения напряжений для $C = 1 \text{ Ф}$ и $R_H = 100 \text{ Ом}$: через равные промежутки времени. Результаты расчетов представлены в таблице 16 приложения А. Для наглядности расчет напряжений был повторен при $t = 10, 20$ и 50 с . (таблица 17 приложения А). По расчетным значениям напряжения построим кривую разряда ионистора, представленную на рисунке 10 приложения Б. В тех же координатах изобразим график разряда ионистора при постоянном сопротивлении R_q . Из представленных на рисунке 10 приложения Б кривых видно, что графики, иллюстрирующие изменение напряжения от 6 до 3 В, находятся между кривой разряда ионистора при постоянном сопротивлении: $u(t) = 6 \cdot e^{\frac{-t}{(100+100) \cdot 1}}$ и прямой линией $u(t) = -3t/100$. Последняя линия представляет собой касательную, проведенную к кривой разряда в точке $t = 0$. Несложно заметить, что при $\Delta t \rightarrow 0$ кривая изменения напряжения стремится к касательной.

В работе [207] рассмотрена зависимость всех составляющих уравнения энергетического баланса от отношения U_{max}/U_{min} . Рассмотрению подлежали:

- полная энергия, накопленная в заряженном ионисторе $W = \frac{CU_{max}^2}{2}$.
- энергия, переданная ионистором в цепь разряда $W_{отд.} = \frac{C(U_{max}^2 - U_{min}^2)}{2}$.
- энергия, полезно используемая нагрузкой $W_H = U_{min} \cdot C \cdot (U_{max} - U_{min})$.
- энергия, утрачиваемая на стабилитроне $W_q = \frac{C(U_{max} - U_{min})^2}{2}$.
- неиспользованная энергия $W_{ост.} = \frac{CU_{min}^2}{2}$.

Значения энергий, рассчитанные по вышеприведенным выражениям, представлены на рисунке 11 приложения Б. График 1 характеризует изменение W_q , график 2 – изменение W_H , график 3 – изменение $W_{ост.}$ и график 4 – величину W .

Нетрудно заметить, что при использовании стабилитрона значительная часть сосредоточенной в ионисторе энергии расходуется нерационально. Например, при двукратном превышении максимального напряжения над минимальным полезному использованию подлежат не более 50% запасенной энергии. Традиционный подход к стабилизации напряжения у потребителя предложено заменить на принцип динамической коммутации, заключающийся в принудительном переключении отдельных ионисторов, суммарная емкость которых эквивалентна расчетной. В различные моменты времени в цепь разряда должны подключаться ионисторы или группы ионисторов, соединенные определенным образом между собой. При этом коммутация ионисторов происходит в функции напряжений на их зажимах.

Рассмотрен разряд группы ионисторов, в которой содержатся от одного до десяти элементов, считая, что до начала процесса они были соединены параллельно, а после начала – последовательно. Принято во внимание, что рассматриваемый контур обладает следующими параметрами: $U_{max} = 10$ В и $C = 1$ Ф. Определим доли неиспользованной энергии для трех значений минимального напряжения на группе ионисторов: в первом случае $U_{min} = 7$ В, во втором – $U_{min} = 5$ В и в третьем – $U_{min} = 3$ В. Результаты расчета представлены в виде графиков на рисунке 12 приложения Б. Эти графики иллюстрируют зависимости доли неиспользованной энергии $W_{ост}$ (%) от количества (n) ионисторов в группе.

Из графиков видно, что, например, для второго случая при изменении количества ионисторов от одного до двух доля неиспользованной энергии уменьшается от 25% до 12,5%. При последующем увеличении количества ионисторов эта доля продолжает снижаться и уже при $n > 5$ становится меньше 1%. Заметим, что при $n \geq 3$ открывается возможность различного соединения ионисторов, как показано на рисунке 17 приложения В. Очевидно, что в начале разряда целесообразно параллельное соединение (рисунок 17.а приложения В), по мере снижения напряжения – комбинированное (рисунок 17.б приложения В) и в конце – последовательное (рисунок 17.в приложения В). Манипу-

ляция схемами соединения ионисторов в группе позволяет поддерживать напряжение на нагрузке в пределах заданного интервала. При этом доля использованной энергии увеличивается, а тепловые потери на стабилитроне исключаются.

Рассмотрено состояние слагаемых уравнения энергетического баланса при параметрической стабилизации и динамической коммутации ионисторов.

Известно, что $W = \frac{CU_{max}^2}{2}$; $W_{осм}(n) = \frac{U_{min}^2 C}{2 \cdot 2^m}$, Для случая $U_{max} = 2U_{min}$
 $W_n(n) = \sum_{i=0}^n \frac{U_{min}^2 C}{2^{2i}}$, где i – порядковый номер коммутации.

При отсутствии стабилитрона

$$W_{отд} = \frac{CU_{max}^2}{2} - \frac{CU_{min}^2}{2 \cdot 2^m} = \frac{C \cdot 2^m U_{max}^2 - CU_{min}^2}{2 \cdot 2^{2m}} = \frac{C(2^{2m} U_{max}^2 - U_{min}^2)}{2 \cdot 2^{2m}}.$$

Результаты расчета компонентов уравнения энергетического баланса, выраженных в относительных единицах от полного объема запасенной энергии представлены в таблице 18 приложения А. Эти результаты получены были получены при различных количествах ионисторов в группе.

Следует отметить, что на практике динамическая коммутация реализуется полупроводниковыми бесконтактными устройствами. При этом продолжительность подключения ионисторов будет зависеть от напряжения на их зажимах. При необходимости уменьшения напряжения на нагрузке в отсутствие параметрической стабилизации возможно осуществить отбор энергии чередованием замкнутого и разомкнутого состояния цепи. При этом требуемое среднее значение напряжения на нагрузке достигается изменением длительности открытого и закрытого состояний коммутирующего устройства. В работе [207] рассмотрен пример разряда ионистора при начальных условиях: $C = 2,5 \text{ Ф}$, $R_{нагр} = 500 \text{ Ом}$, $U_{max} = 10 \text{ В}$, $U_{нагр} = 5 \text{ В}$. Показано, что при наличии стабилитрона разряд ионистора происходит в соответствии с выражением:

$$U = U_{max} \cdot e^{\frac{-t}{R_q(U) + R_H} \cdot C}$$

При этом можно записать: $R_q = \frac{U_{нагр} \cdot R_{нагр}}{u}$

Доказано, что разряд ионистора до номинального значения напряжения, требуемого потребителем, произойдет за 1250 с. Изменение этого напряжения иллюстрируется кривой 1 на рисунке 13 приложения Б. При построении этой зависимости принималось допущение о пошаговом изменении внутреннего сопротивления стабилитрона каждые 100 секунд. В процессе динамической коммутации разряд замедлится, и его продолжительность возрастет до 2500 секунд (кривые 2 на рисунке 13 приложения Б). В результате переключения схемы соединения ионисторов с параллельной на последовательную напряжение на общих зажимах группы ионисторов возрастет [58]. При этом потребитель будет располагать электроэнергией требуемого напряжения. На рисунке 13 приложения Б факт переключения ионисторов отмечен точками пересечения пунктирных вертикальных линий с осью абсцисс.

Схема контактного аналога динамической коммутации внутри группы представлена на рисунке 18 приложения В. Коммутация взаимного соединения ионисторов осуществляется ключами $K1, K2, K3$ и $K4$, а регулирование напряжения у потребителя – ключом $K4$.

Выводы:

1. Объем полезно используемой энергии при разряде ионистора с ростом разности между начальным и конечным значениями напряжениями увеличивается. При двухкратном превышении максимального напряжения над минимальным полезному использованию подлежат 50 % от энергии, заключенной в ионисторе, а при 20-кратном – 95 %.
2. Кривая снижения напряжения на ионисторе в процессе его разряда расположена между графиком разряда при постоянной нагрузке и прямой линией, представляющей собой касательную к этой кривой в начальной точке. При уменьшении длительности разряда кривая снижения напряжения приближается к касательной линии.
3. Разряд ионистора при параметрической стабилизации напряжения у потребителя происходит при следующих составляющих энергетического баланса:
 - полной энергии, накопленной в заряженном ионисторе;

- энергии, переданной ионистором в цепь разряда;
- энергии, полезно используемой нагрузкой;
- энергии, утрачиваемой на стабилитроне;
- неиспользованной энергии.

4. Использование динамической коммутации ионисторов в процессе отбора энергии по сравнению с параметрической стабилизацией позволяет увеличить продолжительность работы низкоэнергетического потребителя в три раза.

3.5.5 Энерго-ресурсосберегающий способ управления поливом

Целью настоящего этапа работы является совершенствование способа управления оборудованием для полива сельскохозяйственных растений в открытом грунте, обеспечивающего сбережение водных и энергетических ресурсов. Известные способы управления основаны либо на формировании управляющего воздействия при отклонении влажности почвы от заданного значения, либо в функции времени. Количество вносимой воды в почву достигается изменением производительности водоподающего оборудования или продолжительности его включения. Управление поливом по возмущающим воздействиям обычно не практикуется из-за многообразия факторов, влияющих на влажность почвы, сложности их учета и высокой вероятности наличия какого-либо неучтенного фактора.

В работах [339, 219, 218, 38] нашел отражение новый способ управления поливом, заключающийся в формировании управляющего воздействия совокупности отклонений нескольких возмущающих воздействий, по отклонению управляемой величины и по прогнозу выпадения осадков. Кроме того алгоритм управления водоподающим оборудованием в качестве «страховки» учитывает отклонение фактической влажности почвы от заданного значения.

В качестве возмущающих воздействий принимаются: температура и влажность воздуха, атмосферное давление, интенсивность осадков и скорость ветра. Количество воды, вносимой в почву, определяется продолжительностью работы водоподающего оборудования. Продолжительность внесения воды не-

обходимо увеличивать пропорционально положительным разностям между заданным g_0 и фактическим y_0 значениями влажности почвы ε_0 , заданным g_1 и фактическим f_1 , значениями влажности воздуха ε_1 , заданным g_2 , и фактическим f_2 значениями интенсивности осадков ε_2 , заданным g_3 , и фактическим f_3 значениями атмосферного давления ε_3 . Сокращение продолжительности внесения воды следует производить при положительных разностях между заданными g_4 и фактическими f_4 значениями температуры воздуха ε_4 , и заданным g_5 фактическим f_5 значениями скорости ветра ε_5 [1, 207]. Кроме того, снесение воды следует приоритетно уменьшать или исключать при положительном прогнозе выпадения осадков в установленное время.

Обобщенное выражение для определения длительности включения водоподающего оборудования определяется в соответствии с выражением:

$$t = \varepsilon_0 \cdot k_0 + \varepsilon_1 \cdot k_1 + \varepsilon_2 \cdot k_2 + \varepsilon_3 \cdot k_3 - \varepsilon_4 \cdot k_4 - \varepsilon_5 \cdot k_5,$$

где k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 и k_5 – коэффициенты, учитывающие значимость каждого из факторов.

Принципиальным отличием разности ε_0 от всех остальных ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ и ε_5) является то, что она определяет отклонение управляемой величины. Остальные разности характеризуют отклонения возмущающих факторов [207].

Предложенный ресурсо-энергосберегающий способ управления поливом может быть реализован посредством автоматической системы, функциональная схема которой представлена на рисунке 19 приложения В. В этой схеме в качестве объекта 1 управления выступает орошаемый участок, характеризующийся фактической влажностью (управляемой величиной y_0). На схеме показан ряд природных факторов, действующих на объект и рассматриваемых как возмущающие воздействия; f_1, f_2, f_3, f_4 и f_5 . Управляющее воздействие определяется подачей воды посредством регулирующего органа 2. Обработка информации и принятие решения осуществляется процессором 3. Учет агротехнических требований производится в блоке 4 задания, на выходе которого формируется задающее воздействие g_0 .

Фактическое значение влажности почвы y измеряется воспринимающим элементом 5, представляющим собой датчик влажности. Соответствующий сигнал поступает на отрицательный вход сумматора 6, в то время как на его положительный вход поступает задающее воздействие g_0 . В сумматоре 6 вычисляется разность: $\varepsilon_0 = g_0 - y_0$. В систему управления введены пять контуров, реализующих принцип «по возмущению». Первый контур предусматривает формирование управляющего воздействия по величине влажности f_1 воздуха, второй – по интенсивности f_2 осадков, третий – по атмосферному давлению f_3 , четвертый – по температуре f_4 воздуха и пятый – по скорости f_5 ветра. Упреждающее изменение управляющего воздействия позволяет повысить быстродействие системы и предотвратить даже кратковременное нарушение влажностного режима. Для обеспечения работоспособности «по возмущению» в систему включены воспринимающие элементы 7, 8, 9, 10 и 11, представляющие собой датчики величин f_1, f_2, f_3, f_4 и f_5 , и сумматоры 12, 13, 14, 15 и 16. Выходы воспринимающих элементов 7, 8, 9, 10 и 11 подключены к отрицательным входам сумматоров 12, 13, 14, 15 и 16, а к их положительным входам – задающие воздействия g_1, g_2, g_3, g_4 и g_5 от блока 4 задания. Регулятор 3 состоит из усилителей 17, 18, 19, 20, 21 и 22, сумматоров 23, 24, 25, 26 и 27, а также процессора 28.

Значимость факторов определяются технологией и задаются оператором посредством выбора коэффициентов передачи в блоках усилителей 17, 18, 19, 20, 21 и 22. Операция суммирования полученных произведений $(\varepsilon_0 \cdot k_0)$, $(\varepsilon_1 \cdot k_1)$, $(\varepsilon_2 \cdot k_2)$, $(\varepsilon_3 \cdot k_3)$, $(\varepsilon_4 \cdot k_4)$ и $(\varepsilon_5 \cdot k_5)$ с учетом их знаков осуществляется сумматорами 23, 24, 25, 26 и 27. Сформированный на выходе сумматора 29 сигнал поступает на вход процессора 28, который определяет продолжительность включения регулирующего органа 2.

Информация о вероятности выпадения осадков доставляется по проводным или беспроводным линиям связи от метеорологических служб. Соответствующие сигналы поступают от приемного блока 29 к решающему блоку 28, входящего в состав процессора 3. При высокой вероятности выпадения осад-

ков поступает приоритетная команда на регулирующий орган 2, после чего полив не возможен.

В работе [207] проанализирована функциональная схема системы автоматического управления влажностью почвы по отклонению управляемой величины, определены дифференциальное уравнение и передаточная функция объекта управления, определен дискретно-нелинейный характер переходных процессов, а также обоснован пропорционально-интегральный закон управления.

Для технической реализации разработанного принципа беспроводного контроля влажности почвы разработано, изготовлено и запатентовано устройство [224, 334], функциональная схема которого представлена на рисунке 20 приложения В.

Выводы по главе 3

1. Анализ состояния развития современных систем отопления объектов АПК показал, что наряду с продолжающимся расширением централизованного подвода тепловой энергии получает распространение и имеет большие перспективы тенденция децентрализованного (автономного) теплообеспечения потребителей. При этом наибольшей эффективностью обладают системы с использованием теплогенерирующих установок на основе природного магистрального газа и теплонасосные системы с преобразованием низкопотенциальной тепловой энергии воздуха, грунта и водоемов. Наиболее перспективными теплообменными устройствами для конвективного сообщения тепловой энергии потребителям являются обогреваемые полы.
2. Усовершенствованная методика расчета низкотемпературных децентрализованных систем отопления предусматривает автоматизированный выбор оптимального соотношения температуры теплоносителя и рабочей поверхности теплообменных аппаратов по минимуму сумме капитальных затрат на проектирование, закупку комплектующих, монтаж и наладку системы отопления и затрат на нагрев и транспортировку теплоносителя. Исходными данными для выбора оптимального соотношения являются требуемая температура, тепло-

технические параметры помещения, погоднo-климатические показатели, а также стоимостные характеристики элементов систем отопления и теплоносителя.

3. В результате исследования динамики теплофизических процессов в автономных теплонасосных системах отопления было доказано, что во избежание утраты работоспособности системы в холодное время года, а также с целью исключения нарушения экологического равновесия вследствие чрезмерного переохлаждения грунта, отбор теплоты от грунтовых теплообменников целесообразно осуществлять поочередно, в импульсном режиме. Продолжительность подключения каждого грунтового теплообменника не должна достигать продолжительности переходного процесса нагрева теплоносителя при традиционном способе отбора теплоты. Установлено, что при поочередном осциллирующем подключении теплообменников к испарительному контуру теплового насоса общее количество теплоты, извлекаемое из грунта, может быть несколько большим, чем при использовании одного теплообменника, эксплуатируемого в установившемся режиме. Кроме того, при реализации энерго-ресурсосберегающего способа подключения грунтовых теплообменников гибкое управление интенсивностью отбора тепловой энергии может быть достигнуто варьированием частотой переключения. Предложены механическое и два электронных устройства для автоматического управления грунтовыми теплообменниками.
4. Показано, что для реализации электростатического способа осаждения пыли в автономных системах отопления с обогреваемыми полами необходимо создать неоднородное электрическое поле в области напольного покрытия. Для образования поля рекомендовано использовать бифилярную обмотку, уложенную на верхней поверхности пола с шагом 5 мм при подаче на нее электрической энергии напряжением 3...5 кВ. Образующиеся при этом векторная сумма пондеромоторной силы и силы тяжести, действующих на частицу пыли массой до 0,5 мг превысит силу, воздействующую на частицу

5. Анализ современных способов интенсификации горения в топочных камерах газовых водогрейных котлов, результаты изучения механизма воздействия озono-воздушной смеси на процесс сжигания топлива, а также математическое моделирование процесса позволили сделать заключение о возможности применения озono-воздушной смеси с концентрацией озона 90...200 мг/куб.м. в качестве окислителя. Например, для электроинтенсификации горения в газовых водогрейных котлах с тепловой мощностью 25 кВт и средним потреблением газа 1 куб.м/ч суточная потребность озона составит 72 г. Для получения такого количества озона необходимо затратить электроэнергию в объеме 4,1 кВт ·ч.
6. В результате теоретических и экспериментальных исследований установлена целесообразность импульсной подачи озона в зону горения. Эффективность импульсного озонирования зависит от параметров топочной камеры и концентрации озono-воздушной смеси. На основе анализа математической модели процесса определена эффективная частота включения озонатора.
7. Обоснована возможность подачи ионизированного озона энергией электрического поля. Установлено, что для обеспечения подачи озono-воздушной смеси с расходом $3,5 \times 10^{-4}$ куб.м/с при концентрации озона 200 мг/куб.м достаточно располагать электрическим напряжением между электродами 18...23 кВ. При этом суточные затраты энергии составят 0,02 кВт ч.
8. Сформирована математическая модель динамического баланса концентрации озона в топочной камере. Проанализирован процесс самораспада озона и получены аналитические зависимости интенсивности его разложения от режимов подачи и параметров котла.
9. Разработан принцип построения автоматизированной системы коммерческого учета водопотребления в различных точках водоподающих сетей посредством непрерывного измерения расхода воды, беспроводной передачи полученной информации на сервер и формирования рекомендаций или управляющих воздействий по рациональному использованию водных ресурсов. Доказано,

что для уменьшения затрат энергии на передачу информации от измерительно-передающих устройств по каналам радиосвязи целесообразно применять последовательную многозвенную ретрансляцию с использованием самонастраивающихся и самовосстанавливающихся структур.

10. Разработаны новые способы автономного питания локально устанавливаемых измерительно-передающих устройств на основе использования кинетической энергии потока воды и рассеянной электромагнитной энергии промышленного происхождения. Установлено, что при снижении напора на 0,35 м при течении воды объемом 1000 куб. м высвобождающаяся энергия составит 1 Вт·ч, чего вполне достаточно для энергообеспечения измерительно-преобразующих устройств в производственных условиях. Доказано, что при напряженности электрического поля 18 В/м возможен полный заряд ионисторов емкостью 60 Ф и напряжением 2,5 В, используемых для аккумуляции преобразованной рассеянной электромагнитной энергии промышленного происхождения.
11. Установлено, что наиболее эффективная работа пьезоэлектрического преобразователя в составе измерительно-передающего устройства достигается при расстоянии между ним и препятствием, составляющим 1,6...1,7 от характеристической длины трубы, сечение которого имеет форму круга. При этом частота вихреобразования растет с увеличением скорости потока и с уменьшением размеров препятствия.
12. Разработана теория и электрооборудование для энергосберегающего аккумуляции электрической энергии в устройствах автономного питания измерительно-передающих устройств. Установлено, что максимальная эффективность использования энергии ионисторов достигается при двукратной разности максимального и номинального напряжения на нагрузке, а их динамическая коммутация за счет изменения схем взаимного соединения позволяет получить дополнительный выигрыш в использовании запасенной энергии. Доказано, что посредством динамической коммутации ионисторов при их подключении к нагрузке в управляемом импульсном режиме возможно увеличение продолжительности работы потребителя в три раза.

13. Разработан ресурсо-энергосберегающий способ управления поливом сельскохозяйственных растений, обеспечивающий точное соблюдение агротехнических требований за счет варьирования длительностью включения водоподающего оборудования по программе в сочетании с результатами оценки отклонений возмущающих воздействий (интенсивности осадков, температуры и влажности воздуха, атмосферного давления и скорости ветра) от заданных значений, с результатами отклонения влажности почвы от эталона, а также с учетом прогноза выпадения осадков. Сформирована математическая модель увлажнения почвы. Установлено, что для обеспечения устойчивой работы системы управления поливом при отсутствии ошибки в установившемся режиме и максимально допустимой ошибке по скорости, решающий блок должен реализовывать пропорционально-интегральный закон управления. При этом определены математические выражения для расчета параметров настройки в виде частных коэффициентов передачи у пропорциональной и интегральной частей.

Глава 4. Способы и технические средства для ресурсо-энергосбережения при эксплуатации СВЧ-оборудования сельскохозяйственного назначения

4.1 Исследования распределения СВЧ-поля в рабочей камере и определение условий равномерного СВЧ-воздействия на обрабатываемые материалы

Обработка сельскохозяйственных материалов энергией СВЧ-электромагнитного поля должна производиться с высокой точностью дозирования. Вместе с тем, создание микроволнового оборудования с идеально совпадающими параметрами поля в каждой точке рабочей камеры на сегодняшний день невозможно. Уменьшение количества (массы, объема) обрабатываемых материалов с целью обеспечения их равномерной обработки сопровождается резким снижением производительности процесса, то есть уменьшением массы материалов, обладающих новыми качественными свойствами. При увеличении количества обрабатываемых материалов ввиду увеличения занимаемого ими объема условия дозирования нарушаются. При этом на часть исходных материалов приходится уменьшенная, а на другую – увеличенная доза воздействия. Таким образом, масса готовой продукции вновь уменьшается. Для сбережения исходных материалов формируется задача определения их количества, при котором отклонение дозы воздействия не превысит допустимую величину: $k_{6\text{доп.}} \rightarrow 0$. Второе уравнение совокупности (2.1) для рассматриваемого случая примет вид: $M(t) = (k_1 \frac{d\varphi_2}{dt} + k_3 \frac{dz_2}{dt})k_5 \cdot \xi + k_{6\text{доп.}}$

Анализируя это уравнение с позиций ресурсосбережения сельскохозяйственных материалов, можно сделать вывод о необходимости проведения исследований по определению $M(t)$ для минимизации $k_{6\text{доп.}}$ по условию $M =$

$$\left[(k_1 \frac{d\varphi_2}{dt} + k_3 \frac{dz_2}{dt})k_5 - D_{\text{доп.}} \right] \xi$$

Целью исследований явилось выявление зависимости наиболее эффективного использования микроволновой установки на базе серийного СВЧ-генератора типа КБН - 82 для обработки сельскохозяйственных материалов и определение производительности процесса, исходя из требований к равномер-

ности воздействия. Поставленная цель достигалась поэтапным решением следующих задач [220]: экспериментальным определением напряженности поля в различных точках рабочей камеры; построением математической модели распределения поля в пространственных координатах; определением координат точки глобального максимума напряженности поля; определением координат и объема области, включающей точки равной напряженности в пределах допустимых отклонений; расчетом производительности процесса при его осуществлении на исследуемой микроволновой установке.

Искомый объем представляет собой некоторое пространство внутри рабочей камеры, в каждой точке которого напряженность поля будет отличаться от заданной на заранее допустимую величину. В дальнейшем изложении этот объем именовался эквинапряженным пространством. Для решения поставленной задачи были произведены экспериментальные исследования распределения поля в рабочей камере серийной отечественной СВЧ-установки КБН - 82. Пространство рабочей камеры было разбито на 27 областей, располагающихся на трех уровнях по длине (Y), ширине (X), и высоте (Z). Места расположения каждой области определялись координатами точек, заключающихся в их центрах. При этом точка начала координат размещалась в дальнем левом нижнем углу рабочей камеры (см. рисунок 21 приложения В). Традиционные электрические датчики напряженности поля в эксперименте не использовались, поскольку они содержат токопроводящие элементы, локализирующие и искажающие исследуемое поле. Информация об интенсивности СВЧ-воздействия получалась косвенным образом – по количеству теплоты, выделяемой в нагреваемых диэлектрических объектах, размещаемых в исследуемых областях. В качестве нагреваемых объектов использовалась вода, содержащаяся в мерной емкости из органического стекла. В работах [84, 118] описаны последовательность и условия проведения эксперимента, а также приведено обоснование использования воды. В процессе эксперимента замерялась начальная и конечная температура воды. Искомое количество энергии, именуемое в дальнейшем дозой, находилось в соответствии с выражением:

$$D=C (T_K - T_H) \quad (4.1),$$

где C – теплоемкость воды ($C=4,19$ кДж/кг·град); T_K и T_H – конечная и начальная температура воды соответственно, °С. Продолжительность нагрева составляла 40 с. Результаты эксперимента, проведенного в четырехкратной повторности, представлены в таблице 19 приложения А. В последнем столбце таблицы представлены средние значения дозы, полученные как средние арифметические значения результатов измерений по четырем повторностям.

Поскольку зависимость дозы от каждой переменной (x ; y ; z) не является линейной, рекогносцировочная математическая модель распределения поля в пространственных координатах определялась в виде системы регрессионных уравнений второго порядка. По массиву экспериментальных данных составлялась математическая модель распределения поля $D = f(x, y, z)$. На первых этапах исследований для описания этого процесса использовалось выражение вида [135]:

$$D = \frac{1}{D_0^2} (a_1 x^2 + d_1 x + c_1)(a_2 y^2 + d_2 y + c_2)(a_3 z^2 + d_3 z + c_3), \quad (4.2)$$

сформированное методом узловых точки с дозой D_0 . При этом суммы, заключенные в скобках модели (4.2), рассматривались как однофакторные уравнения регрессии при постоянстве двух других факторов.

$$\begin{cases} D = a_1 x^2 + d_1 x + c_1 ; y = const, z = const \\ D = a_2 y^2 + d_2 y + c_2 ; x = const, z = const \\ D = a_3 z^2 + d_3 z + c_3 ; x = const, y = const \end{cases} \quad (4.3)$$

Коэффициенты a_i , b_i и c_i определялись из систем линейных уравнений, сформированных на основе метода наименьших квадратов:

$$\begin{cases} a_1 \sum_{i=1}^3 x_i^4 + d_1 \sum_{i=1}^3 x_i^3 + c_1 \sum_{i=1}^3 x_i^2 = \sum_{i=1}^3 x_i^2 D_i; \\ a_1 \sum_{i=1}^3 x_i^3 + d_1 \sum_{i=1}^3 x_i^2 + c_1 \sum_{i=1}^3 x_i = \sum_{i=1}^3 x_i D_i; \\ a_1 \sum_{i=1}^3 x_i^2 + d_1 \sum_{i=1}^3 x_i + 3c_1 = \sum_{i=1}^3 D_i \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\begin{cases} a_2 \sum_{i=1}^3 y_i^4 + d_2 \sum_{i=1}^3 y_i^3 + c_2 \sum_{i=1}^3 y_i^2 = \sum_{i=1}^3 y_i^2 D_i; \\ a_2 \sum_{i=1}^3 y_i^3 + d_2 \sum_{i=1}^3 y_i^2 + c_2 \sum_{i=1}^3 y_i = \sum_{i=1}^3 y_i D_i; \\ a_2 \sum_{i=1}^3 y_i^2 + d_2 \sum_{i=1}^3 y_i + 3c_2 = \sum_{i=1}^3 D_i \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\begin{cases} a_3 \sum_{i=1}^3 z_i^4 + d_3 \sum_{i=1}^3 z_i^3 + c_3 \sum_{i=1}^3 z_i^2 = \sum_{i=1}^3 z_i^2 D_i; \\ a_3 \sum_{i=1}^3 z_i^3 + d_3 \sum_{i=1}^3 z_i^2 + c_3 \sum_{i=1}^3 z_i = \sum_{i=1}^3 z_i D_i; \\ a_3 \sum_{i=1}^3 z_i^2 + d_3 \sum_{i=1}^3 z_i + 3c_3 = \sum_{i=1}^3 D_i \end{cases} \quad (4.6)$$

В результате решения систем (4.4), (4.5) и (4.6), были найдены следующие значения параметров модели (4.2):

$$a_0 = -58,3 \cdot 10^{-3}; d_1 = 11,6 \cdot 10^{-1}; c_1 = 218;$$

$$a_2 = -22,6 \cdot 10^{-2}; d_2 = 58,5 \cdot 10^{-1}; c_2 = 186,4;$$

$$a_3 = -13,6 \cdot 10^{-1}; d_3 = 13,7; c_3 = 189,8$$

Для проверки качества модели в нее подставлялись исходные значения независимых переменных x, y и z , а полученные значения дозы $D_{теор.}$ сравнивались с экспериментальными $D_{экс.}$ (см. таблицу 20 приложения А):

$$\Delta = \frac{D_{теор.} - D_{экс.}}{D_{экс.}} \cdot 100\%$$

Далее определялись стационарные точки как корни систем уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{D_0^2} (2a_1x + d_1)(a_2y^2 + d_2y + c_2)(a_3z^2 + d_3z + c_3) = 0 \\ \frac{1}{D_0^2} (2a_2y + d_2)(a_1x^2 + d_1x + c_1)(a_3z^2 + d_3z + c_3) = 0 \\ \frac{1}{D_0^2} (2a_3z + d_3)(a_2y^2 + d_2y + c_2)(a_1x^2 + d_1x + c_1) = 0 \end{cases}$$

Численные значения стационарных точек сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Стационарные точки исследуемой функции

Наименование координаты	Значения стационарных точек		
x	9,97	71,99 -52,05	71,99 -52,05
y	44,42 -18,56	12,90	44,42 -18,56
z	17,86 -7,81	17,86 -7,81	5,03

Из совокупности стационарных точек выбирались значения, соответствующие глобальному максимуму: $x_0 = 9,97$ см, $y_0 = 12,90$ см и $z_0 = 5,03$ см. Эти значения признавались координатами точки, соответствующей максимальной дозе энергии (22,42 кДж/кг), сообщаемой обрабатываемому материалу. Очевидно, что для достижения максимального КПД микроволновой установки «КБН - 82» обработку сельскохозяйственных продуктов СВЧ-полем целесооб-

разно проводить в окрестности найденной точки. Удаление от точки в любом направлении будет сопровождаться уменьшением дозы. Поэтому вопрос о максимальном объеме обрабатываемых продуктов определялся допустимым отклонением дозы от установленного значения. При известном допустимом отклонении все точки в объеме обрабатываемых продуктов должны получать дозу облучения, отличающуюся от установленной на величину, не превышающую это отклонение.

Вычисление максимального объема обрабатываемых продуктов при известном допустимом отклонении дозы начиналось с определения координат и конфигурации поверхности второго порядка, замыкающей эквипотенциальное пространство. Для решения поставленной задачи с помощью компьютера было проведено пошаговое исследование пространства в окрестности точки с координатами x_0 , y_0 , z_0 . Составленная программа обеспечивает вычисления функции (4.2) в точке x_0 , y_0 , z_0 и сравнение полученного результата со значением минимально допустимой дозы D_d . В случае выполнения условия $D - D_d \geq 0$ значения x_0 , y_0 получают приращение в виде Δx и Δy соответственно. Процедура вычислений повторяется. Невыполнение условия $D - D_d \geq 0$ свидетельствует о выходе на искомую поверхность. Это сопровождается фиксированием текущих значений x и y и переходом к новому значению z при начальных x_0 , y_0 .

Для автоматического задания приращений независимых переменных в программе использована модель расходящейся спирали Архимеда. Известно, что в полярных координатах спираль Архимеда описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \theta = \omega t; \\ \tau = vt, \end{cases} \quad (4.7)$$

где ω - угловая скорость луча, рад/с; v - поступательная скорость движения луча из центра полярных координат, см/с.

При переходе к прямоугольным координатам использованы уравнения:

$$\begin{cases} x = vt \cos \omega t \\ y = vt \sin \omega t \end{cases} \quad (4.8)$$

где $v = 2,7 \dots 10^{-4}$; $\omega = 1$ и $t = 45^\circ$.

Указанные значения выбраны таким образом, чтобы за каждый оборот спирали имело место увеличения ее радиуса на 0,1 см. Алгоритм машинного исследования процесса представлен на рисунке 14 приложения Б [220].

Внутренний объем эллипсоида образует пространство, внутри которого каждая точка характеризуется одинаковой дозой (напряженностью) в пределах допустимого отклонения. Дискретность модели обуславливает представление спирали в виде совокупности ломанных прямых с периодом квантования образующего луча 45° . Таким образом, искомая поверхность второго порядка определяется образующими цилиндров, совмещенных основаниями и имеющих общую ось вращения. Установлено, что в центре рабочей камеры при $z = 5,03$ см радиус основания цилиндра является максимальным.

Изменения z в любом направлении уменьшает радиус основания цилиндра (рисунок 4.1).

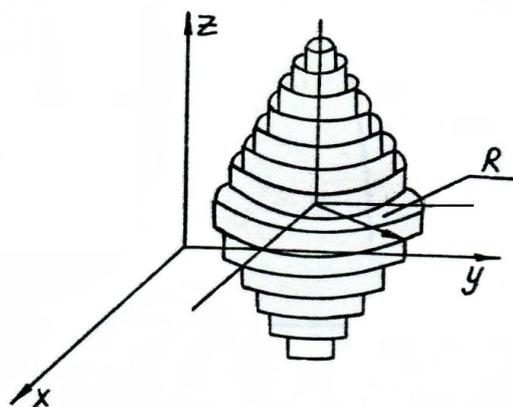


Рисунок 4.1. – Область рабочей камеры с точками равной напряженности поля

При неограниченном увеличении количества цилиндров с одновременным уменьшением их высот найденная поверхность вырождается в эллипсоид [67]. Внутренний объем эллипсоида образует пространство, внутри которого каждая точка характеризуется одинаковой дозой (напряженностью) в пределах

допустимого отклонения. В результате машинного счета при допустимых отклонениях в 5, 10, 15 и 20% найдены геометрические размеры ряда эллипсоидов и их местонахождение в рабочей камере. Полученные данные позволили сделать вывод о целесообразности проведения СВЧ обработки в окрестностях точки со следующими координатами $x=9,97$; $y=12,93$; $z=5,03$ см. При этом габариты обрабатываемых продуктов не должны выходить за рамки, ограничиваемые окружностями с радиусами R . Зависимость радиусов R от высоты продукта Z и допустимого отклонения дозы ΔD представлена на рисунке 15 приложения Б.

Объемы эллипсоидов вычислялись в соответствии с выражением

$$V=\pi h \sum_{i=1}^{23} R_i^2 \quad (4.9)$$

где h – высота цилиндра, $h=0,5$ см; R_i – радиус основания i -го цилиндра, см.

С учетом (4.9) определяем объемы эллипсоидов и для допустимых отклонений дозы 5, 10, 15 и 20%, которые составили 470, 1538, 2466, 3072 см³ соответственно.

Производительность микроволновой установки КБН №82 рассчитывались по формуле:

$$P=3,6 \frac{V \rho}{t+t_{on}} \quad (4.10)$$

где v - объем эллипсоида при допустимом отклонении дозы, см³; ρ - плотность обрабатываемого продукта г/см³; t - средняя продолжительность СВЧ обработки, / t_{on} - продолжительность вспомогательных операций, с.

Так, при СВЧ-обработке материалов с плотностью 0,8 г/см³ при допустимом отклонении дозы в 10% производительность микроволновой установки составит

$$P=3,6 \cdot \frac{1538 \cdot 0,8}{30+20}=88,6 \text{ кг/ч.}$$

Таким образом, относительная неравномерность распределения поля не исключает возможности использования микроволновой печи «КБН - 82» для СВЧ обработки сельскохозяйственных продуктов, а лишь накладывает заданные ограничения к их размещению и объему.

Для повышения точности математического описания было принято решение об использовании нелинейной трехфакторной полиномиальной модели, включающей 10 параметров [102]:

$$D_{\text{нелин.}} = b_0 + b_1x + b_2y + b_3z + b_4x^2 + b_5y^2 + b_6z^2 + b_7xy + b_8xz + b_9, \quad (4.11)$$

. Ввиду отсутствия готовой компьютерной программы для расчета значений $b_1 \dots b_9$ дальнейшие действия свелись к ручному формированию системы десяти линейных алгебраических уравнений и ее последующему решению с помощью вычислительных средств.

В основу стратегии поиска параметров b_0, \dots, b_9 был положен метод наименьших квадратов, согласно которому минимизировались суммы квадратов отклонений теоретических и экспериментальных значений дозы во всех 27 точках эксперимента.

Минимизируемая сумма квадратов отклонений имеет вид:

$$M = \sum_{i=1}^{27} S_i^2 =$$

$$(b_0 + b_1x_1 + b_2y_1 + b_3z_1 + b_4x_1^2 + b_5y_1^2 + b_6z_1^2 + b_7x_1y_1 + b_8x_1z_1 + b_9y_1z_1 - D_{\text{эсп.12}} +$$

$$+(b_0 + b_1x_2 + b_2y_2 + b_3z_2 + b_4x_2^2 + b_5y_2^2 + b_6z_2^2 + b_7x_2y_2 + b_8x_2z_2 + b_9y_2z_2 - D_{\text{эсп.12}} +$$

.....

$$+ (b_0 + b_1x_{27} + b_2y_{27} + b_3z_{27} + b_4x_{27}^2 + b_5y_{27}^2 + b_6z_{27}^2 + b_7x_{27}y_{27} + b_8x_{27}z_{27} + b_9y_{27}z_{27} - D_{\text{эсп.27}})^2 \quad (4.12)$$

Выражение (4.12) последовательно дифференцировалось по переменным $b_0, b_1, b_2 \dots b_9$, а полученные результаты приравнивались к нулю. При этом слагаемые, соответствующие экспериментальным значениям дозы, переносились в правую часть:

$$\frac{\partial M}{\partial b_0} = 27 b_0 + 397,8b_1 + 340,2b_2 + 135b_3 + 8868,6 b_4 + 5556,6b_5 + 1125b_6$$

$$+ 5012,28b_7 + 1989b_8 + 1701b_9 = 4983$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial b_1} &= 397,8b_0 + 8868,6b_1 + 5012,28b_2 + 1989b_3 + 233328,74b_4 \\ &\quad + 81867,24b_5 + 16575b_6 + 111744,36b_7 + 44343b_8 + 25061,4b_9 \\ &= 71138,84 \end{aligned}$$

.....

...

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial b_9} &= 1701b_0 + 25061,4b_1 + 27783b_2 + 14175b_3 + 558721,8b_4 \\ &\quad + 510095,88b_5 + 12758b_6 + 409336,2b_7 + 208845b_8 + 231525b_9 \end{aligned}$$

В результате решения системы получены следующие значения параметров:

$$b_0 = 151,78; b_1 = 0,90; b_2 = 5,35; b_3 = 13,04;$$

$$b_4 = -0,05; b_5 = -0,21; b_6 = -1,32; b_7 = 0,00026;$$

$$b_8 = 0,0127; b_9 = 0,0058.$$

При подстановке исходных значений x , y и z в выражение (4.11) получен ряд значений $D_{\text{нелин.}}$, сведенный в восьмой столбец таблицы 20 приложения А. В результате сравнения качества моделей (4.2) и (4.11) были выявлены преимущества полиномиальной математической модели, проявляющиеся в снижении максимального отклонения теоретических значений дозы от экспериментальных до 1,9 % и средней величины этих отклонений до 0,71 %. Для нахождения экстремума продифференцируем выражение

(4.12) по x , y и z и приравняем полученные выражения к нулю:

$$\begin{cases} \frac{\partial D}{\partial x} = b_1 + 2b_4x + b_7y + b_8z = 0 \\ \frac{\partial D}{\partial y} = b_2 + 2b_5y + b_7x + b_9z = 0 \\ \frac{\partial D}{\partial z} = b_3 + 2b_6z + b_8x + b_9y = 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

Решим систему уравнений (4.13) методом Крамера:

$$x = \frac{\Delta x}{\Delta}; y = \frac{\Delta y}{\Delta}; z = \frac{\Delta z}{\Delta}, \text{ где}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 2b_4 & b_7 & b_8 \\ b_7 & 2b_5 & b_9 \\ b_8 & b_9 & 2b_6 \end{vmatrix}; \quad \Delta_x = \begin{vmatrix} -b_1 & b_7 & b_8 \\ -b_2 & 2b_5 & b_9 \\ -b_3 & b_9 & 2b_6 \end{vmatrix}; \quad \Delta_y = \begin{vmatrix} 2b_4 & -b_1 & b_8 \\ b_7 & -b_2 & b_9 \\ b_8 & -b_3 & 2b_6 \end{vmatrix}; \quad \Delta_z = \begin{vmatrix} 2b_4 & b_7 & -b_1 \\ b_7 & 2b_5 & -b_2 \\ b_8 & b_9 & -b_3 \end{vmatrix}$$

После подстановки численных значений $b_0 \dots b_9$, будем иметь:

$$x_0 = 9,8; y_0 = 13,1; z_0 = 4,9.$$

Таким образом, в точке пространства с координатами x_0, y_0, z_0 возможно существование экстремального значения функции (4.11). Для проверки выполнения достаточного условия наличия экстремума найдем частные производные высших порядков:

$$\frac{\partial^2 D}{\partial x^2} = (D'_x)'_x = D''_{xx} = (b_1 + 2b_4x + b_7y + b_8z)'_x = 2b_4 = -0,62$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial x \partial y} = (D'_x)'_y = D''_{xy} = (b_1 + 2b_4x + b_7y + b_8z)'_y = b_7 = 0,00026$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial x \partial z} = (D'_x)'_z = D''_{xz} = (b_1 + 2b_4x + b_7y + b_8z)'_z = b_8 = 0,012$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial y^2} = (D'_y)'_y = D''_{yy} = (b_2 + 2b_5y + b_7x + b_9z)'_y = 2b_5 = -0,4$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial y \partial x} = (D'_y)'_x = D''_{yx} = (b_2 + 2b_5y + b_7x + b_9z)'_x = b_7 = 0,00026$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial y \partial z} = (D'_y)'_z = D''_{yz} = (b_2 + 2b_5y + b_7x + b_9z)'_z = b_9 = 0,0057$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial z^2} = (D'_z)'_z = D''_{zz} = (b_3 + 2b_6 + b_8x + b_9y)'_z = 2b_6 = -2,64$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial z \partial x} = (D'_z)'_x = D''_{zx} = (b_2 + 2b_5y + b_7x + b_9z)'_x = b_8 = 0,012$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial z \partial y} = (D'_z)'_y = D''_{zy} = (b_2 + 2b_5y + b_7x + b_9z)'_y = b_9 = 0,0057$$

На основании равенств $D''_{xy} = D''_{yx}$, $D''_{xz} = D''_{zx}$, $D''_{yz} = D''_{zy}$ в соответствии с теоремой Шварца делаем вывод о непрерывности исследуемой функции.

Для определения характера экстремумов составим матрицу Гессе:

$$|G| = \begin{vmatrix} D''_{xx} & D''_{xy} & D''_{xz} \\ D''_{yx} & D''_{yy} & D''_{yz} \\ D''_{zx} & D''_{zy} & D''_{zz} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2b_4 & b_7 & b_8 \\ b_7 & 2b_5 & b_9 \\ b_8 & b_9 & 2b_6 \end{vmatrix} \quad (4.14)$$

и найдем диагональные миноры:

$$\Delta_1 = 2b_4 = -0,10; \Delta_2 = \begin{vmatrix} 2b_4 & b_7 \\ b_7 & 2b_5 \end{vmatrix} = 0,04; \Delta_3 = \begin{vmatrix} 2b_4 & b_7 & b_8 \\ b_7 & 2b_5 & b_9 \\ b_8 & b_9 & 2b_6 \end{vmatrix} = -0,109$$

По чередованию знаков диагональных миноров в соответствии с критерием Сильвестра сделан вывод о максимальном характере экстремума в исследуемой точке. Очевидно, что наибольший КПД СВЧ-воздействия может быть достигнут в области найденной точки. При удалении области обработки от этой точки доза воздействия будет уменьшаться. Поэтому определение компримиссного объема (эквинапряженного пространства) рекомендуется осуществлять посредством многократной подстановки в модель (4.11) меняющихся с определенным шагом значений координат x, y и z и сравнения полученной дозы с заранее установленным значением. При анализе модели (3.2) алгоритм интерполяции пространства по модели заключался в фиксировании координаты z и одновременном приращении x и y в полярных координатах. Из центра этих координат, соответствующего точке размещения D_{max} , исходил поворачивающийся и увеличивающийся вектор. При этом конец этого вектора совершал движение по расходящейся спирали Архимеда. По достижении условия $D_{max} - D_{нелин.} > S$ осуществлялись определение координат очередной граничной точки, возвращение к начальным координатам x и y , приращение координаты z и возобновление обследования пространства на новой высоте. Таким образом, эквинапряженное пространство представляло собой своеобразный набор дисков с общей осью [262].

Для упрощения использования предложенной методики был разработан новый алгоритм исследования, в котором в эквинапряженное пространство рассматривается в форме шара. Шар – правильное геометрическое тело, легко описываемое аналитическими функциями и характеризующееся максимальным объемом при минимальной поверхности. Аналогично предыдущему случаю точки исследуемого пространства подвергаются проверке на выполнение условия $D_{max} - D_{нелин.} > S$. При этом в процессе исследования шар произво-

дит впечатления «раздувающегося», поскольку его радиус постепенно увеличивается.

В ходе исследований поверхность шара с радиусом R была разделена на $2N$ поясов. При этом ширина каждого пояса составляет величину $h = \frac{R}{N}$. Если при наблюдении сбоку пояса параллельны поверхности земли, то ширину каждого из них предложено рассматривать как толщину соответствующего слоя или высота. Приняв за начало отсчета верхний (северный) полюс шара, пояса с числами от 1 до N были пронумерованы с текущим номером k . Таким образом, слой с номером N располагается на экваторе, а последующие слои, находящиеся в нижнем полушарии, имеют номера от $N + 1$ до $2N$. Нижнее основание слоя с номером k удалено от северного полюса на величину $kh = k \frac{R}{N}$, а от нижнего (южного) полюса – на $2R - k \frac{R}{N}$.

Расположение нижнего основания произвольного слоя внутри шара при взгляде сбоку представлено на рисунке 4.2.

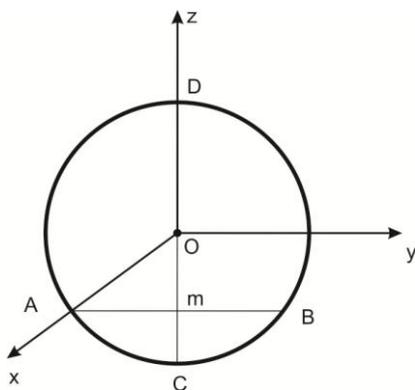


Рисунок 4.2 – Расположение нижнего основания произвольного слоя внутри шара.

Нижнее основание слоя определяется хордой AB , а диаметр шара – отрезком CD , который также является частным видом хорды. В соответствии со свойством пересекающихся хорд сформировано равенство:

$$AM \cdot MB = DM \cdot MC. \quad (4.15)$$

Присутствующий в выражении (4.15) множитель MC определяет расстояние от нижнего основания слоя до южного полюса, которое мы ранее представили

как $2R - k \frac{R}{N}$. Аналогично сомножитель DM соответствует расстоянию между нижним основанием слоя до северного полюса, то есть величине $k \frac{R}{N}$. Таким образом, $AM \cdot MB = k \frac{R}{N} \cdot \left(2R - k \frac{R}{N}\right)$.

Легко заметить, что отрезки AM и MB являются радиусами нижнего основания среза с центром в точке M . В результате обозначения этого радиуса символом f сформировано равенство:

$$f = AM = MB$$

$$\text{Тогда } f^2 = k \frac{R}{N} \cdot \left(2R - k \frac{R}{N}\right) \text{ и } f = \sqrt{k \frac{R}{N} \cdot \left(2R - k \frac{R}{N}\right)}.$$

Радиус нижнего основания k -го среза оказался выраженным через известный радиус R шара, количество срезов (поясов) N на одном полушарии и порядковый номер k среза:

$$f = R \sqrt{\frac{k}{N} \left(2 - \frac{k}{N}\right)} \quad (4.16)$$

Задаваясь величинами R и N , и варьируя значениями k от 1 до N , получен ряд значений радиусов нижних оснований срезов, пронизывающих весь объем шара. После введения новой системы координат, начало отсчета оказалось в точке максимальной дозы x_0, y_0, z_0 и одновременно в центре моделируемого шара. При этом оси координат направлены параллельно плоскостям рабочей камеры. Окружности, образуемые нижними основаниями каждого среза, были разделены на m частей. Для описания этих окружностей использованы соотношения:

$$x = f \cdot \cos \alpha \text{ и } y = f \cdot \sin \alpha$$

где α – угол, образуемый вектором, исходящим из начала координат с осями новой системы координат, $0 \leq \alpha \leq 360^\circ$

Для достижения перемещения контрольной точки по исследуемому поясу осуществлялись многократные расчеты координат x и y при различных α . По завершении полного поворота на 360° и невыполнении условия $D_{max} - D_{нелин.} > S$ производилось смещение на следующий пояс, который удален от

северного полюса шара на величину kh . Фактически это смещение будет осуществляться за счет изменения параметра k , входящего в формулу (4.16). Для организации вычислительных циклов значениям α присвоены текущие номера в виде индексов j , меняющихся от 1 до m и значениям k , меняющихся от 1 до N . На рисунке 16 приложения Б представлен алгоритм компьютерного расчета эквинапряженного пространства в рабочей камере, реализующего модель «раздувающегося» шара [135].

Представленный алгоритм реализован на языке программирования Visual Basic и после подстановки численных значений позволил установить, что для минимально допустимого значения дозы воздействия 200 кДж/кг радиус эквинапряженного шарообразного пространства составляет 4,2 см, откуда максимальный объем единовременно обрабатываемых материалов окажется равным 310 см³.

Описанная методика позволяет анализировать любые микроволновые установки циклического действия и избежать ошибок при обосновании выборе компромисса между производительностью и качеством обработки. Определение эквипотенциального пространства можно произвести и теоретически, основываясь на общих закономерностях распространения СВЧ-поля и взяв за основу результаты эксперимента, сведенные в таблицу 20 приложения А [132, 118]. В таком случае, вернувшись к модели (4.2), можно записать [243]:

$$D = \frac{1}{(D_0)^{n-1}} \cdot \prod_{j=1}^n f_j(v_j), \quad (4.17)$$

где D_0 – значение дозы в узловой точке с координатами $x = 11,4$ см, $y = 12,6$ см, $z = 5$ см. n – количество факторов, $n = 3$; j – номер однофакторной функции и номер фактора; v_j – фактор, $v_1 = x$, $v_2 = y$, $v_3 = z$.

Возможность использования выражения (4.17) для теоретического исследования обусловлена положительностью D_0 , а также подчиняемостью изучаемого процесса мультипликативному влиянию факторов [132].

Трехфакторная модель (4.2), ранее полученную методом узловой точки, представлена в виде

$$D = D_1(A - (x - a)^2) \cdot (B - (y - b)^2) \cdot (C - (z - c)^2), \quad (4.18)$$

где $D_1 = \frac{1}{D_0^2}$; $a = x_0$; $b = y_0$; $c = z_0$;

$$A = a^2 + C_1; B = b^2 + C_2; C = c^2 + C_3$$

При рассмотрении поверхности уровня этой функции система координат была преобразована посредством смещения исходного начала отсчета $O(0,0,0)$ в точку $M_0(a, b, c)$. Тогда выражение (4.18) преобразовалось к виду

$$D = D_1(A - x^2)(B - y^2)(C - z^2)$$

При этом максимальное значение дозы, приходящееся на линию уровня, определяется выражением: $D = D_{max} = D_1ABC$. Для выполнения условия

$D_0 < D_{max}$ необходимо вычислить объем, ограниченный поверхностью уровня

$$D_0: D_1(A - x^2)(B - y^2)(C - z^2) = D_0$$

Искомый объем определялся с помощью тройного интеграла [281]

$$V = \iiint_V 1 \cdot dx \cdot dy \cdot dz = \int_{z_{min}}^{z_{max}} dz \cdot \iint_{V_z} 1 \cdot dx \cdot dy,$$

где V_z – плоское сечение объема V . (замкнутая плоскость пространства), ограниченного линией

$$(A - x^2)(B - y^2) = \frac{D_0}{D_1(C - z^2)}$$

$$\text{Обозначим: } U = \frac{D_0}{D_1(C - z^2)}.$$

Построим линию $(A - x^2)(B - y^2) = U$, которая симметрична относительно осей OX и OY . Пусть $x > 0, y > 0$.

$$\text{Тогда } y = \sqrt{B - \frac{U}{A - x^2}}. \quad (4.19)$$

Легко заметить, что при возрастании x будет наблюдаться уменьшение y .

В результате дифференцирования выражения (4.19) получим:

$$y' = \frac{Ux}{\sqrt{B - \frac{U}{A - x^2}} \cdot (A - x^2)^2}. \quad (4.20)$$

Из выражения (4.20) видно, что при $x \rightarrow 0$ $y' \rightarrow 0$. Одновременно при

$$x \rightarrow \sqrt{A - \frac{U}{B}} \quad y' \rightarrow \infty.$$

$$\text{Тогда } B - \frac{U}{A - x^2} = 0. \text{ Откуда } x = \sqrt{A - \frac{U}{B}}.$$

Вычислим площадь

$$\begin{aligned} \iint_{V_z} 1 \cdot dx \cdot dy &= 4 \int_0^{\sqrt{A-\frac{U}{B}}} dx \cdot \int_0^{\sqrt{B-\frac{U}{A-x^2}}} dy = 4 \int_0^{\sqrt{A-\frac{U}{B}}} \sqrt{B-\frac{U}{A-x^2}} \cdot dx = \\ &= 4 \int_0^{\sqrt{A-\frac{U}{B}}} \sqrt{\frac{AB-Bx^2-U}{A-x^2}} \cdot dx. \end{aligned} \quad (4.21)$$

Принимая во внимание возможность представления координаты x в виде тригонометрической функции $x = \sqrt{A} \cdot \sin t$, было сформировано следующее выражение для определения площади:

$$f(z) = 4 \int_0^{\arcsin \sqrt{A-\frac{U}{AB}}} \sqrt{(AB-U) - AB \sin^2 t} \cdot dt \quad (4.22)$$

Поскольку $\frac{D_9}{D_1(C-z^2)} \leq AB$, можно утверждать, что $C - z^2 \geq \frac{D_9}{D_{AB}}$.

Аналогично при $z^2 \leq C - \frac{D_0}{D_{1FC}}$ $|z| \leq \sqrt{C - \frac{D_0}{D_{1AB}}}$

Для определения искомого объема необходимо вычислить значение интеграла:

$$V = 2 \int_0^{\sqrt{C - \frac{D_0}{D_{1AB}}}} f(z) dz,$$

где $C = z_0^2 + C_3$; $A = x_0^2 + C_1$; $B = y_0^2 + C_2$

Таким образом, выполняя перечисленные действия для известных значений дозы микроволнового воздействия в узловой точке, максимально допустимого отклонения дозы в соответствии с требованиями технологического процесса, а также для известной зависимости дозы от координат, возможно определение рабочего объема, удовлетворяющего условиям равномерности микроволновой обработки сельскохозяйственных материалов.

Для аналитического определения пространства рабочей камеры, все точки которого характеризуются примерно одинаковыми напряженностями СВЧ-поля, предложена методика, описанная в работе [84, 220]. При этом были учтены результаты предшествующих исследований, изменены значения координат точек замеров и использована более точная математическая модель. В но-

вом эксперименте объем резонатора был разбит на три уровня по длине ($x = 0; 11$ и 22 см), ширине ($y = 0; 11,85$ и $23,7$ см) и высоте ($z = 0; 9,73$ и $19,5$ см). За начало отсчета была взята точка в ее дальнем, левом нижнем углу. Результаты эксперимента сведены в таблицу 21 приложения А.

При составлении математической модели изучаемого процесса $D = f(x; y; z)$. было отдано предпочтение традиционной полиномиальной форме.

$$D = c_1 + c_2x + c_3y + c_4z + c_5x^2 + c_6xy + c_7xz + c_8y^2 + c_9yz + c_{10}z^2 + c_{11}x^3 + c_{12}x^2y + c_{13}x^2z + c_{14}xy^2 + c_{15}xyz + c_{16}xz^2 + c_{17}y^3 + c_{18}y^2z + c_{19}yz^2 + c_{20}z^3, \quad (4.23)$$

где $c_1 \dots c_{20}$ – коэффициенты, определенные методом наименьших квадратов.

В результате расчета были получены следующие значения:

$$\begin{aligned} c_1 &= 167,02 & c_6 &= 0,01 & c_{11} &= 0 & c_{16} &= -6,43 \cdot 10^{-3} \\ c_2 &= 1,95 & c_7 &= 0,17 & c_{12} &= 2,38 \cdot 10^{-3} & c_{17} &= 0 \\ c_3 &= -2,24 & c_8 &= 0,11 & c_{13} &= -2,66 \cdot 10^{-3} & c_{18} &= -4,53 \cdot 10^{-3} \\ c_4 &= 0,31 & c_9 &= 0,09 & c_{14} &= -1,73 \cdot 10^{-3} & c_{19} &= -8,29 \cdot 10^{-4} \\ c_5 &= -0,15 & c_{10} &= 0,02 & c_{15} &= 8,77 \cdot 10^{-4} & c_{20} &= 0 \end{aligned}$$

Полученная модель содержит 17 статистически значимых коэффициентов и адекватно описывает процесс распределения СВЧ-поля в объемном резонаторе. В таблице 22 приложения А приведены средние экспериментальные значения дозы, значения, полученные по математической модели (4.22), а также процентные отклонения, вычисленные по формуле:

$D = 100 \left(\frac{D_{\text{т}}}{D_{\text{э}}} - 1 \right)$, где $D_{\text{э}}$ – среднее экспериментальное значение дозы; $D_{\text{т}}$ – теоретическое значение дозы, полученное по модели.

Эффективным показателем качества моделей по одному и тому же процессу является сумма квадратов отклонений, рассчитанная в соответствии с выражением:

$$\delta = \sum_{i=1}^n (D_{\text{э}i} - D_{\text{т}i})^2, \quad (4.24)$$

В результате расчета было установлено, что сумма квадратов отклонений $\delta^{III} = 1693,52$, образуемая кубическим полиномом, примерно в 1,3 раза меньше того же показателя $\delta^{II} = 2124,37$. для квадратичной зависимости.

Определение максимума функции (4,22) осуществлялось методом Розенброка, потребовавшего инверсию знаков всех членов исходного выражения и придания определенных численных значений отправным аргументам x_0, y_0 и z_0 . Полученные значения рассматривались как отправные величины для следующих итераций до достижения стабилизации во втором знаке после запятой. Результаты вычислений проверялись комплекс-методом и методом переменной метрики с применением соответствующих компьютерных программ.

При отправных аргументах $x_0 = 10$ см, $y_0 = 18$ см и $z_0 = 18$ см и значении $D_0 = 210,57$ кДж/кг координаты максимума соответствовали следующему ряду: $x = 9,2$ см, $y = 23,7$ см $z = 19,5$ см, а $D = 228,73$ кДж/кг. При отправных аргументах $x_0 = 3$ см, $y_0 = 10$ см, $z_0 = 10$ см и $x_0 = 20$ см, $y_0 = 10$ см и $z_0 = 2$ см результаты оказались весьма близкими: $D = 228,65$ кДж/кг ($x = 9,1$ см, $y = 23,7$ см, $z = 19,5$ см) и $D = 228,64$ кДж/кг ($x = 10,1$ см, $y = 23,7$ см, $z = 19,5$ см) соответственно. Таким образом, найденные координаты можно считать центром локализации СВЧ-поля в пространстве рабочей камеры, а режим обработки продуктов в его окрестности – наиболее интенсивным и экономичным.

Для оперативного поиска оптимального места расположения обрабатываемых материалов в объемном резонаторе доза СВЧ-воздействия осуществлено графическое представление дозы в функции пространственных координат. Построение этих зависимостей осуществлялось на фиксированных уровнях z с шагом $\Delta z = 4$ см. При этом исходная функция $D = f(x; y; z)$ рассматривалась в частном виде: $D = f_0(x; y)$.

Из области значений $f_0(x; y)$ выбиралась доза D_0 , образующая правую часть равенства $f_0(x; y) = D_0$. Первое сочетание $x = x_0$ и $y = y_0$, обеспечивающее выход на линию уровня, определялось посредством минимизации функции

$f(x; y) = [D_0 - f_0(x; y)]^2$. Поиск последующих пар x и y осуществлялся в соответствии со следующими рассуждениями.

Пусть линия уровня описывается уравнением $y = y(x)$. Тогда по ее определению можно записать [118, 84]:

$$v(x) = f_0[x; y(x)] = D \quad (4.25)$$

Важно отметить, что выражение (4.25) справедливо для всех x . Дифференцируя $y(x)$ как сложную функцию, получено:

$$\frac{dv(x)}{dx} = \frac{\partial f_0}{\partial x} [x; y(x)] + \frac{\partial f_0}{\partial y} [x; y(x)] \frac{dy}{dx} = 0 \quad (4.26)$$

Разделяя переменные, приводим выражение (4.26) к виду:

$$\frac{dy}{dx} = \left(-\frac{\partial f_0}{\partial x} \right) / \left(\frac{\partial f_0}{\partial y} \right).$$

После введения обозначения $g(x, y) = \left(-\frac{\partial f_0}{\partial x} \right) / \left(\frac{\partial f_0}{\partial y} \right)$ записано:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx} = g(x, y) \\ y(x_0) = y_0 \end{cases} \quad (4.27)$$

Система (4.27) представляет собой обыкновенное дифференциальное уравнение с начальными условиями. Производя численное интегрирование этого уравнения, легко получить приближенное решение для построения линий уровня. На рисунке 17 приложения Б (а, б, в и г) представлены графики линий уровня в плоскости XOY на высотах $z = 4, 8, 12$ и 16 см соответственно. В обозначениях линий уровня используются двухзначные числа, цифры в которых соответствуют закодированным величинам постоянных доз дискрет. Численные значения дискрет приведены в таблице 23 приложения А.

Таким образом, графики на рисунке 17 приложения Б представляют собой семейство рабочих кривых, связывающих координаты пространства и требуемые дозы СВЧ-воздействия. Для практического использования полученных графиков необходимо для заданной дозы СВЧ-обработки найти соответствующую кодировку дискреты и, принимая во внимание высоту расположения материалов в рабочей камере, подобрать его оптимальное расположение на плоскости.

Выводы;

1. Распределение поля внутри объемного резонатора удовлетворительно описывается неполным полиномом третьего порядка.
2. Координаты точки максимальной напряженности СВЧ-поля в объемном резонаторе серийной установки КБН - 82 при размещении начала координат в его дальнем нижнем углу соответствуют следующим значениям: $x = 9,5$ см, $y = 23,7$ см, $z = 19,5$ см.
3. Для определения места расположения обрабатываемых материалов, обеспечивающего наиболее равномерное СВЧ-воздействие в объемном резонаторе, необходимо выбрать наиболее удобную координату по оси OZ и подобрать расположение материалов на плоскости XOY , исходя из набора дискрет по линиям уровня на построенном изображении семейства рабочих кривых.
4. Для упрощенного определения координат эквинапряженного пространства в рабочей камере микроволнового оборудования можно воспользоваться разработанной методикой с применением цифровой модели расходящейся спирали Архимеда или «раздувающегося шара».

4.2 Разработка способов и технических средств защиты СВЧ-установок от аварийного режима

4.2.1 Состояние вопроса по автоматическому распознаванию аварийного режима СВЧ-генератора

Автоматическое отключение питания СВЧ-генератора при аварийном режиме решает задачу сбережения элементов материального оборудования. К такому оборудованию, в первую очередь, относится генераторная лампа – магнетрон, стоимость которого составляет 30...50% от стоимости микроволновой установки. Аварийный режим возникает при отсутствии обрабатываемого материала в рабочей камере и проявляется возникновением обратной волны, разрушающей катод магнетрона. Во избежание выхода из строя магнетрона необходимо осуществлять автоматический контроль наличия

обрабатываемых материалов в рабочей камере и в случае их отсутствия немедленно отключать питание. Для этой задачи на основе второго уравнения совокупности (2.1) можно записать условие: $\frac{d\varphi_2}{dt} = 0$ при $M = 0$. Таким образом, для достижения ресурсосбережения при эксплуатации микроволнового оборудования необходимо разработать способы для выполнения этого условия.

Для предотвращения выхода из строя магнетрона при возникновении аварийного режима можно предложить три меры: немедленное введение в рабочую камеру хотя бы минимального количества энергопоглощающего материала; постоянное наличие в рабочей камере некоторого балласта, поглощающего часть энергии СВЧ-поля и автоматическое распознавание аварийного режима с последующим выключением микроволновой установки.

Техническая реализация первой из перечисленных мер является неудобной, поскольку из-за особенностей технологического процесса обрабатываемый материал в момент возникновения аварийного режима может отсутствовать. Например, при порционной обработке грунта, семян и других сельскохозяйственных материалов на заключительном этапе процесса последняя порция может оказаться неполной. При поступательном движении мобильной микроволновой установки для СВЧ-обработки почвы излучатель в какой-то момент может оказаться на некотором удалении от почвы в связи с неровностями ее поверхности: наличием углублений, ям и т.д.

Использование балласта связано с неизбежной потерей части выработанной СВЧ-энергии, поскольку в балласте происходит ее бесполезное преобразование в тепловую форму. Кроме того, при продолжительной работе микроволновой установки балласт может нагреться до недопустимо высокой температуры, что потребует его замены или создание условий для охлаждения. В противном случае будет иметь место тепловое воздействие нагретого балласта на обрабатываемые материалы посредством теплообмена. Вместе с тем, использование балласта можно рассматривать как частный прием, успешно реализуемый в узкоспециализированных установках.

К наиболее надежным мерам предотвращения выхода из строя магнетрона следует отнести автоматическое распознавание аварийного режима и последующее выключение микроволновой установки [163]. Для осуществления этой меры необходимо наличие достоверной информации об аварийном режиме в виде электрического сигнала. Современные технические средства позволяют сформировать информативный по широкому спектру признаков. В работе [220] рассмотрен ряд соответствующих способов распознавания аварийного режима и сделан вывод об их ограниченности.

4.2.2 Выявление зависимости формы кривой тока в цепи питания магнетрона от наличия нагрузки в рабочей камере

Рекогносцировочные исследования по выявлению электрического параметра цепи питания магнетрона от режимов работы микроволновой установки проводились на серийном СВЧ-генераторе КБН-82 (рисунок 22 приложения В). При этом в разрыв анодной цепи магнетрона подключалось активное сопротивление $R7$, а параллельно ему (между точками A и B) – вход электронно-лучевого осциллографа [157].

В результате эксперимента было отмечено, что нагрузка, размещаемая в рабочей камере, влияет на форму кривой измеряемого тока. Виды кривых тока в цепи анодного питания магнетрона при нормальном и аварийном режимах работы представлены на рисунках 4.3 и 4.4 соответственно.

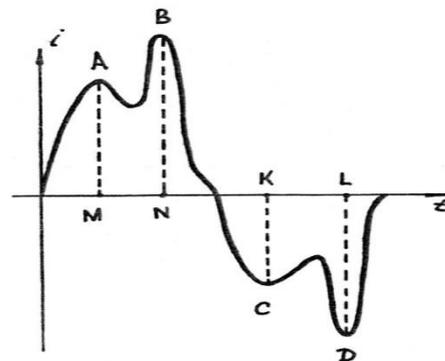
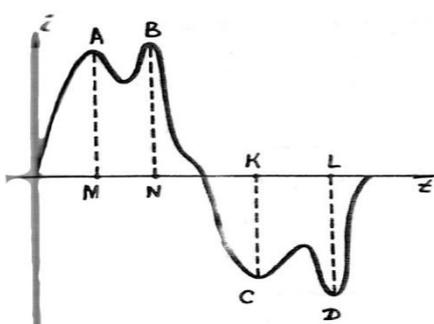


Рисунок 4.3 – Осциллограмма кривой анодного тока при нормальном режиме работы. Рисунок 4.4 – Осциллограмма кривой анодного тока при аварийном режиме работы.

режиме работы СВЧ-генератора режиме работы СВЧ-генератора

Полученные кривые являются несимметричными относительно оси абсцисс (первый полупериод характеризуется несколько меньшими амплитудами) и содержат по три экстремума на каждом полупериоде. Легко заметить, что при переходе от нормального режима работы к аварийному форма кривой тока существенно искажается. При этом ординаты первого и четвертого экстремумов (AM и СК) уменьшаются, а ординаты третьего и пятого экстремумов (BN и DL) увеличиваются. Значения ординат рассматриваемых экстремумов, соответствующих различным режимам работы, сведены в таблицу 24 приложения А.

Для повышения эффективности выявленного признака при его использовании для выявления аварийного режима целесообразно производить одновременное измерение ординат всех четырех экстремумов с последующим сложением первой с четвертой, третьей с пятой и вычитанием первой суммы из второй. При этом, как видно из таблицы 24 приложения А информативные числа ε , соответствующие нормальному и аварийному режимам, различаются более чем в 3,5 раза [220, 80, 53, 163]. Таким образом, замеряя и сопоставляя ординаты экстремумов кривых тока в цепи анодного питания магнетрона, можно получить текущую информацию о режиме работы СВЧ-генератора.

При снижении напряжения питания генератора ординаты всех экстремумов уменьшаются, а форма кривой тока приближается к синусоидальной. При напряжении, составляющем 80...85% номинального, выделить ординаты исследуемых экстремумов практически невозможно. Поскольку функция кривой тока является периодической и удовлетворяет условиям Дирихле, она может быть представлена в виде тригонометрического ряда Фурье:

$$y(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + A_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots$$

$$= \sum_{k=1}^n A_k \sin(k\omega t + \varphi_k) \text{ или } y(t) = a_0 + \sum_{k=1}^n (a_k \cos \omega_k t + b_k \sin \omega_k t)$$

$$\text{где } a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt, \quad (4.28)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos \omega_k t dt \quad (4.29)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin \omega_k t dt \quad (4.30)$$

В приближенном вычислении параметров ряда интегралы (4.28) , (4.29) и (4.30) заменим суммами конечного количества слагаемых:

$$a_0 = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^m y(t) \quad (4.31)$$

$$a_k = \frac{2}{m} y(t) \cos(2ki\pi/m) \quad (4.32)$$

$$b_k = \frac{2}{m} y(t) \sin(2ki\pi/m) \quad (4.33)$$

где k – номер гармонической составляющей; $k = 1, 2, 3, \dots, n$; m – количество аппроксимирующих ординат, а значения амплитуд и фаз вычислим по формулам:

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad (4.34)$$

$$\varphi_k = \arctg \frac{b_k}{a_k} \quad (4.35)$$

Для приближенного вычисления параметров ряда Фурье воспользуемся графо-аналитическим методом Перри. Разложение в тригонометрический ряд функций, представленных на рисунке.4.3 и рисунке 4.4, показало, что наиболее зависящими от массы обрабатываемого материала оказываются амплитуды третьей и пятой гармонических составляющих. Величины этих амплитуд, соответствующие нормальному и аварийному режимам работы СВЧ-генератора, сведены в таблицу 25 приложения А [80].

Аналогично предыдущему случаю разрешающую способность метода можно повысить благодаря одновременному выделению и измерению амплитуд третьей и пятой гармоник с последующим их сопоставлением. При гармоническом анализе исследуемых кривых амплитуды третьей и пятой гармонической составляющих целесообразно сложить. Таким образом, рекогносцировочные экспериментальные исследования подтвердили предположение о возможности получения информации о режиме работы СВЧ-генератора по форме кривой тока в цепи анодного питания магнетрона. Однако для разработки автоматических распознающих устройств пришлось провести статистически обоснованный эксперимент при достаточно большом объеме наблюдений.

Эксперимент осуществлялся в шестнадцатикратной повторности. При нормальном режиме работы в резонатор помещалась нагрузка, представляющая собой стеклянную емкость объемом 0,5 литра с водопроводной водой. При аварийном режиме нагрузка отсутствовала. Осциллограммы кривых тока в цепи анодного питания магнетрона визуализировались на экране осциллографа типа Н700 и фотографировались на светочувствительной бумаге при скорости перемещения последней 0,2 м/с. Для последующего анализа экспериментальных данных полученные кривые аппроксимировались отрезками ломаных прямых на интервале от 0 до 2π с шагом $1/28$ или $1/30$ периода. Значения ординат, образуемых от восстановления перпендикуляров из точек излома аппроксимированной кривой к оси абсцисс, использовались для определения параметров гармонических составляющих. Каждая из этих составляющих характеризовались амплитудой A_i , фазой φ_i и частотой f_i .

Первичная обработка результатов эксперимента показала, что наряду с достаточной информативностью амплитуд ряда гармонических составляющих их фазы не имеют однозначной корреляции с режимом работы СВЧ-генератора. Поэтому дальнейший анализ полученных данных проводился исключительно по амплитудам. Значения амплитуд гармонических составляющих при нормальном A'_i и аварийном A''_i сведены в таблицы 26 приложения А и таблицы 27 приложения А соответственно.

Поскольку срабатывание распознающего устройства будет осуществляться по среднему значению выделенной гармоники, последующее исследование экспериментального массива сводилось к проверке гипотезы H_0 о равенстве средних A_i в нормальном и аварийном режимах. При этом вывод об информативности определенной гармоники можно будет сделать лишь в том случае, если гипотеза H_0 окажется отвергнутой. В работе [220] осуществлен статистический расчет результатов эксперимента, в ходе которого был выявлен характер распределения, коэффициент асимметрии g_1 , коэффициент эксцесса g_2 , а также их гипотетические среднеквадратические отклонения σ_{g_1} и σ_{g_2} .

Результаты, сведенные в таблицу 28 приложения А показали отсутствие существенных превышений $|g_{1i}|$ и $|g_{2i}|$ их гипотетических средних квадратических отклонений σ_{g_1} и σ_{g_2} , что позволило сделать вывод о нормальности исследуемого распределения. Для проверки гипотезы H_0 вычислялась статистика t , имеющая распределение Стьюдента с $n - 1$ степенями свободы, а затем для каждой пары выборок определялся интегральный закон распределения Стьюдента [271]. При этом интеграл в правой части вычислялся в элементарных функциях:

$$S_n(t) = \begin{cases} \sin \sum_{i=0}^{\frac{n}{2}-1} \cos^{2i} \varphi \prod_{j=0}^{i-1} \frac{2j+1}{2j+2} & n - \text{четное} \\ \frac{2}{\pi} \left\{ \varphi + tg \varphi \sum_{i=1}^{\frac{n-1}{2}} \cos^{2i} \varphi \prod_{j=1}^{i-1} \frac{2j}{2j+1} \right\} & n - \text{нечетное} \end{cases} \quad (4.36)$$

где $\varphi = \arctg \frac{t}{\sqrt{\pi}}$

Уровень значимости для каждой гармонической составляющей определялся в соответствии с выражением:

$$Q = 1 - S_n(t) \quad (4.37)$$

Значения статистики t статистической надежности $S_n(t)$ и уровня значимости Q сведены в таблицу 29 приложения А. Здесь же представлены величины относительных изменений амплитуд гармонических составляющих при переходе от нормального режима к аварийному.

В результате сравнения полученных уровней значимости с максимально допустимым ($Q_0 = 0,05$), сделан вывод о возможности автоматического контроля режима работы СВЧ-генератора по A_0 , A_1 , A_5 и A_9 [220, 39]. Принимая во внимание относительное изменение средних значений амплитуд при переходе от нормального режима работы к аварийному, выявлена наибольшую информативность пятой гармонической составляющей.

4.2.3 Моделирование переходных процессов в цепи анодного питания магнетрона при нормальном и аварийном режимах работы СВЧ-генератора

Исходными данными для последующих рассуждений явились описанные в 4.2.2 результаты экспериментов, доказывающих зависимость формы кривой тока в цепи питания магнетрона от режимов работы СВЧ-генератора. Очевидно, что выявленная зависимость обусловлена влиянием режимов на параметры элементов, входящих в состав схемы питания. Для определения этих параметров рассматривались переходные процессы в цепи питания магнетрона по схеме, показанной на рисунке 4.5.а. Эта схема представляет собой фрагмент технического решения, используемого в серийном СВЧ-генераторе КБН-82. Для упрощения анализа из реальной схемы были исключены элементы, реализующие сигнальные и защитные функции.

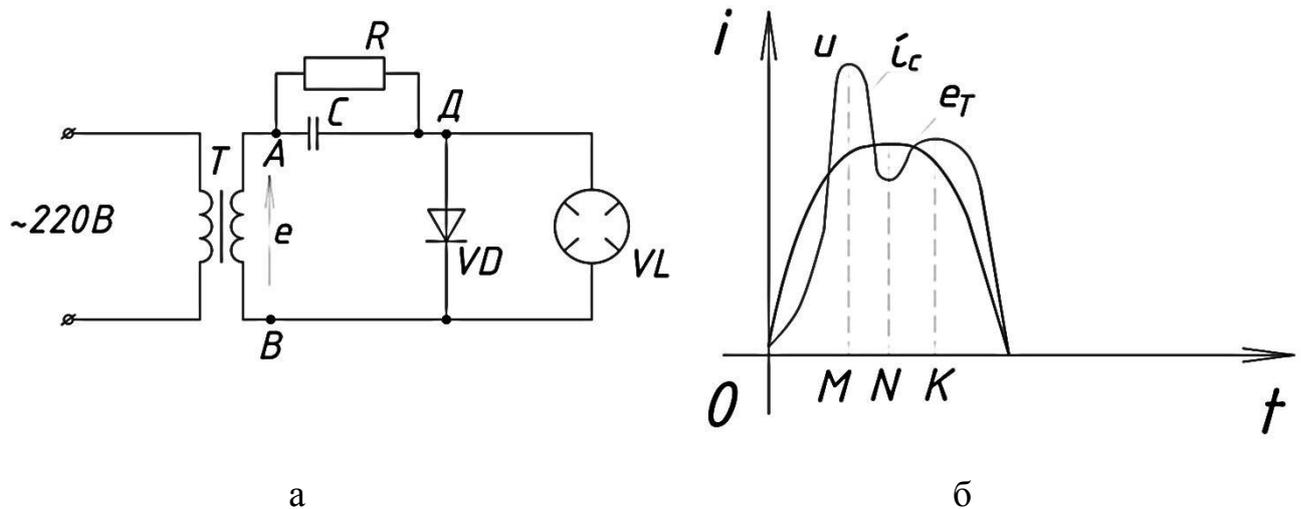


Рисунок 4.5 – Принципиальная электрическая схема питания магнетрона (а) и график зависимости мгновенных значений тока и напряжений (б) от времени.

Между точками A и B вторичной обмотки трансформатора T формируется переменное напряжение с действующим значением 220 В. Предположим, что в начальный момент наших рассуждений это напряжение имеет направление, показанное стрелкой. Через конденсатор C и шунтирующий его резистор R , а также через диод VD протекает ток. Конденсатор C заряжается, приобретая ЭДС встречного направления. Вследствие синусоидальности ЭДС на вторич-

ной обмотке трансформатора T и его наложения на ранее накопленный заряд конденсатора, результирующее значение напряжения приобретает довольно сложную форму. Вначале напряжение экспоненциально возрастает (участок OM на рисунке 4.5.б), затем следует его уменьшение (участок MN), обусловленное уменьшением амплитуды питающего напряжения. Наконец, под совокупным воздействием питающего напряжения и противодействующей ЭДС конденсатора происходит вторичное нарастание тока (участок NK).

Когда ЭДС на вторичной обмотке трансформатора меняет свое направление, электрический ток протекает через конденсатор C и магнетрон VL . Это сопровождается удвоением анодного напряжения U_{VD} , так как направления ЭДС трансформатора и заряда конденсатора совпадают. При отсутствии нагрузки в объемном резонаторе начинается обратная бомбардировка катода [250] а величина комплексного сопротивления системы «магнетрон-нагрузка» изменяется. В рассматриваемой схеме это должно выразаться изменением сопротивления магнетрона VL (между точками B и D) и повлечь за собой дальнейшее искажение формы кривой.

Рассмотрим схему замещения питания магнетрона, представленную на рисунке 4.6. а. В этой схеме индуктивности L_1 и L_2 , а также сопротивления R_1 и R_2 отражают рассеяние энергии на первичной и вторичной обмотках трансформатора T , а взаимоиндуктивность M и активное сопротивление R_B – энергетические потери в стали на намагничивание. Конденсатор C и полупроводниковый диод VD являются реальными элементами. Магнетрон VL представлен в виде активного сопротивления R_D .

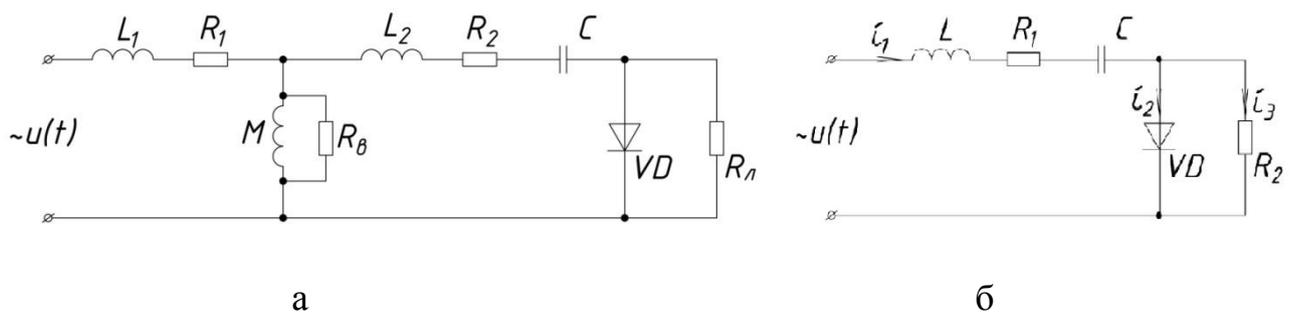


Рисунок 4.6 – Схемы замещения питания магнетрона.

В результате преобразования и упрощения эта схема была приведена к виду, представленному на рисунке 4.6 б. Для доказательства зависимости формы кривой анодного тока i_1 от сопротивления магнетрона (эквивалентного сопротивления R_2) составим систему уравнений [270]:

$$\begin{cases} L \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + \frac{1}{C} \int i_1 dt + u_{VD} = u(t) \\ L \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + \frac{1}{C} \int i_1 dt + R_2 i_3 = u(t) \\ i_1 = i_2 + i_3 \end{cases} \quad (4.38)$$

В первом уравнении системы (4.38) u_{VD} отражает мгновенное значение напряжения на диоде VD . Известно, что Вольт-Амперная характеристика полупроводникового диода является нелинейной и может быть представлена изображением, показанным на рисунке 4.7.а. Простой аппроксимацией нелинейной характеристики диода является выражение вида $i = ue^u$. Однако слагаемое в первом уравнении системы (4/38) должно характеризовать не ток, а напряжение. Поэтому Вольт-Амперную характеристику диода следует представить в виде $u = e^i$. Последняя зависимость не позволяет произвести точное количественное описание нелинейности, однако она объективно иллюстрирует принцип однополупериодного выпрямления.

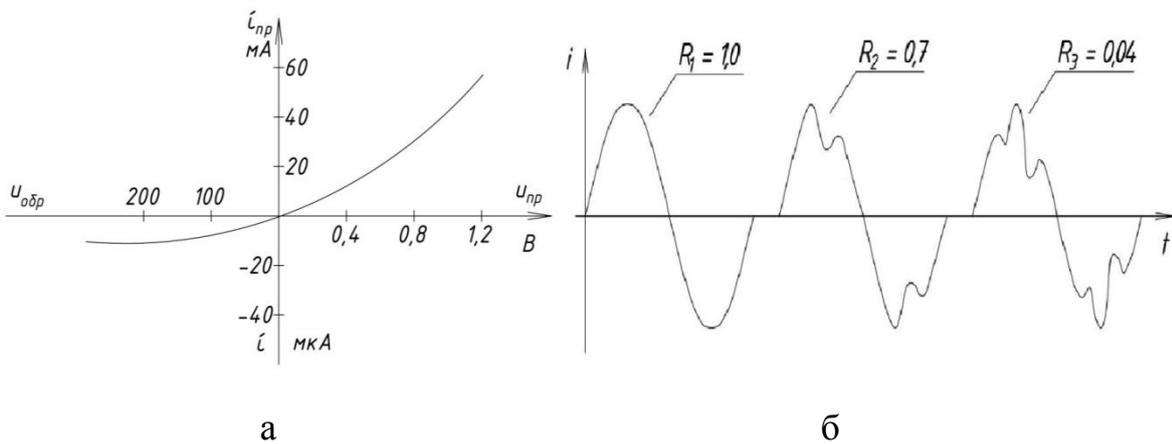


Рисунок 4.7. Вольт-Амперная характеристика диода (а) и осциллограммы кривых анодного тока (б), полученные по модели.

Используя преобразование Лапласа, запишем уравнения системы (4.41) в операторной форме:

$$\begin{cases} Lpi_1 + R_1i_1 + \frac{1}{cp}i_1 + e^{i2} = u(p) \\ Lpi_1 + R_1i_1 + \frac{1}{cp}i_1 + R_2i_3 = u(p) \\ i_1 = i_2 + i_3 \end{cases} \quad (4.39)$$

Приведем систему (4.42) к каноническому виду:

$$\begin{cases} Lpi_1 + R_1i_1 + \frac{1}{cp}i_1 + e^{i2} - u(p) = 0 \\ Lpi_1 + R_1i_1 + \frac{1}{cp}i_1 + R_2i_3 - u(p) = 0 \\ i_1 - i_2 - i_3 = 0 \end{cases} \quad (4.40)$$

Моделирование процесса, описываемого уравнениями системы (4.40) осуществлялось на аналого-цифровой гибридной вычислительной машине «Экстрема-1» [260, 261].

Для реализации моделирования введем машинные переменные:

$$u(p) \rightarrow x_2; i_1 \rightarrow x_3; i_2 \rightarrow x_8; i_3 \rightarrow x_7.$$

С учетом замены система уравнений (4.43) записано в виде:

$$\begin{cases} Lpx_3 + R_1x_3 + \frac{1}{cp}x_3 + e^{x_8} - x_2 = 0 \\ Lpx_3 + R_1x_3 + \frac{1}{cp}x_3 + R_2x_7 - x_2 = 0 \\ x_3 - x_8 - x_7 = 0 \end{cases} \quad (4.41)$$

Моделирование тригонометрической функции времени, описывающей синусоидальное входное напряжение $U(t)$, произведем с помощью вспомогательной системы машинных уравнений [107]:

$$\begin{cases} px_1 - x_2 = 0 \\ px_2 + x_1 = 0 \end{cases} \quad (4.42)$$

В результате присоединения (4.42) к основной системе (4.41), было получено:

$$\begin{cases} Lpx_3 + R_1x_3 + \frac{1}{cp}x_3 + e^{x_8} - x_2 = 0 \\ Lpx_3 + R_1x_3 + \frac{1}{cp}x_3 + R_2x_7 - x_2 = 0 \\ x_3 - x_8 - x_7 = 0 \\ px_1 - x_2 = 0 \\ px_2 + x_1 = 0 \end{cases} \quad (4.43)$$

Для обозначения суммы $\left[Lpx_3 + R_1x_3 + \frac{1}{cp}x_3 \right]$ введена новая переменная x_6 .

Тогда система (4.43) преобразуется к виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} CLp^3x_3 + CR_1px_3 + x_3 - cpx_6 = 0 \\ x_6 - e^{x_8} - x_2 = 0 \\ x_6 + R_2x_7 - x_2 = 0 \\ x_3 - x_8 - x_7 = 0 \\ px_1 - x_2 = 0 \\ px_2 + x_1 = 0 \end{array} \right. \quad (4.44)$$

Для реализации производных px_3 и p^2x_3 были использованы дополнительные переменные x_4 и x_5 соответственно. С учетом произведенной замены получена система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} px_1 - x_2 = 0 \\ px_2 + x_1 = 0 \\ px_3 - x_4 = 0 \\ px_4 - x_5 = 0 \\ px_6 - \frac{c}{c}lx_5 - \frac{c}{c}R_1x_4 - \frac{1}{c}x_3 = 0 \\ x_6 + e^{x_8} - x_2 = 0 \\ x_6 + R_2x_7 - x_2 = 0 \\ x_3 - x_8 - x_7 = 0 \end{array} \right. \quad (4.45)$$

Система (4.45) была сведена к системе машинных уравнений, благодаря их упрощению и расположению в требуемом порядке построчно:

$$\left\{ \begin{array}{l} px_1 - x_2 = 0 \\ px_2 + x_1 = 0 \\ px_3 - x_4 = 0 \\ px_4 - x_5 = 0 \\ x_3 - x_8 - x_7 = 0 \\ px_6 - \frac{c}{c}lx_5 - \frac{c}{c}R_1x_4 - \frac{1}{c}x_3 = 0 \\ x_6 + e^{x_8} - x_2 = 0 \\ x_6 + R_2x_7 - x_2 = 0 \end{array} \right. \quad (3.46)$$

При моделировании процесса, описываемого уравнениями системы (3.46) производились наблюдения за изменением кривой тока при варьировании значением R_2 от 0 до 1 [86]. В результате на экране осциллографа были получены экспериментальные осциллограммы, представленные на рисунке 4.13 б. Анализ осциллограмм позволяет принять утверждение о влиянии нагрузки на ре-

жим работы магнетрона и сделать вывод о наличии зависимости между внутренним сопротивлением магнетрона и формой анализируемой кривой.

4.2.4 Технические решения по защите СВЧ-генераторов от аварийных режимов по форме кривой тока в цепи анодного питания магнетрона

На основе принципа выделения и последующего усиления пятой гармоники разработано автоматическое отключающее устройство [9, 220], обеспечивающее немедленное отключение питания СВЧ-генератора при его включении без нагрузки. Функциональная схема микроволновой установки на основе серийного СВЧ-генератора КБН-82 с устройством защиты представлена на рисунке 4.8, а ее принципиальная электрическая схема – на рисунке 4.9.

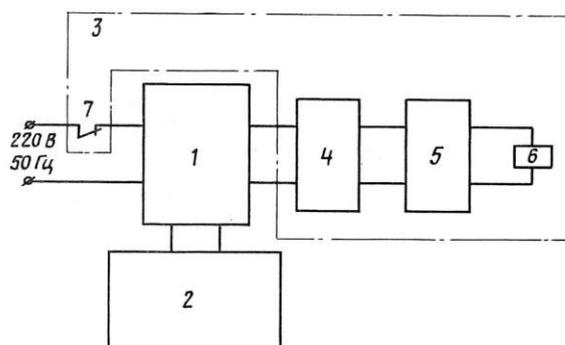


Рисунок 4.8 – Функциональная схема микроволновой установки с устройством защиты

Микроволновая установка содержит СВЧ-генератор 1, на магнетроне VL , сочлененный с рабочей камерой 2 и устройство 3 защиты, включенное в цепь анодного питания. Устройство 3 защиты состоит из полосового фильтра 4 на частоту 250 Гц, выполненного на конденсаторах $C3$ и $C4$ и дросселях $L3$ и $L4$, и имеющего электрическую связь со входом трехкаскадного усилителя.

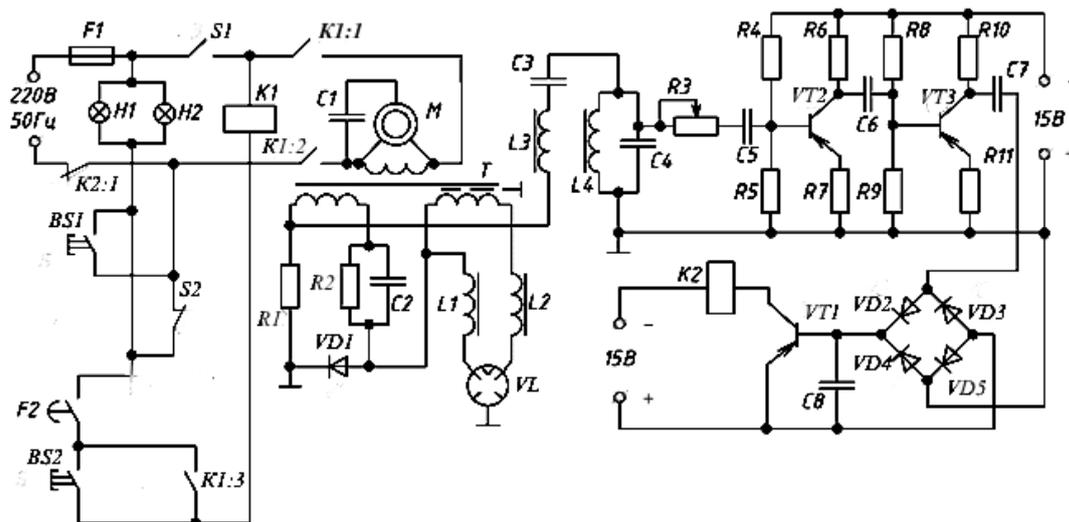


Рисунок 4.9 – Принципиальная электрическая схема микроволновой установки с устройством защиты

Усилитель 5 собран на полупроводниковых триодах $VT3$, $VT4$ и $VT9$. К выходу усилителя 5 подсоединена обмотка катушки $K2$ реле 6, нормально замкнутые контакты которого установлены в цепи питания СВЧ-генератора 1.

Микроволновая установка также содержит электродвигатель 9 дисектора, а цепь питания включает трансформатор T . Для освещения рабочей камеры 2 в процессе СВЧ-воздействия на обрабатываемые материалы предусмотрены лампы $H1$ и $H2$, а также кнопка $S1$. Термодатчик B и конечные выключатели $S3$ и $S4$ включены в цепь питания катушки $K1$ реле. Перед триодом $VT9$ в схему включен выпрямительный мост на диодах $VD3...VD6$.

При номинальной нагрузке СВЧ-генератор 1 вырабатывает сверхвысокочастотные электромагнитные колебания, которые, попадая в рабочую камеру 2, воздействуют на находящиеся внутри нее обрабатываемые материалы. Форма кривой тока в цепи анодного питания магнетрона VL близка к синусоидальной, и величина напряжения на выходе полосового фильтра 4 на частоту 250 Гц не превышает 64...68 мВ. Это напряжение поступает на вход усилителя 5 и управляет работой подключенной к его выходу обмоткой катушки $K2$ реле 6. Напряжение на выходе усилителя 5 составляет 10,1...10,7 В, что ниже напряжения срабатывания реле 6, нормально замкнутые контакты 7 которого остаются во включенном состоянии, обеспечивая питания СВЧ-генератора 1.

При отсутствии нагрузки внутри рабочей камеры 2 образуется аварийный режим, характеризующийся появлением отраженной волны и искажением формы кривой тока в цепи анодного питания магнетрона VL . Напряжение на выходе полосового фильтра 4 на частоту 250 Гц возрастает до 82...85 мВ, что вызывает соответствующее увеличение напряжения на выходе усилителя 5 до значений 13,0...13,5 В. Это напряжение оказывается достаточным для срабатывания реле 6. Нормально замкнутые контакты 7 размыкаются и цепь питания СВЧ-генератора 1 обесточивается. Для повторного включения микроволновой установки необходимо устранить причину аварийного режима и произвести подачу питания вручную.

Несмотря на удовлетворительную воспроизводимость обнаруженного эффекта и его успешную техническую реализацию в ряде устройствах защиты с течением времени было отмечено, что при прогреве магнетрона его характеристики несколько изменяются (рисунок 18 приложения Б). Эти изменения могут привести к нарушению процесса распознавания аварийного режима и должны быть искусственно скомпенсированы. Для количественной оценки указанной зависимости проведен эксперимент, в ходе которого в течение 20 минут после включения СВЧ-установки замерялись температура на поверхности магнетрона и величина пятой гармонической составляющей. Эксперимент проведен в трехкратной повторности на трех магнетронах М105-1 при нормальной нагрузке в рабочей камере. Температура магнетрона оценивалась по линейно зависящему напряжению на выходе полупроводникового термодатчика. Результаты эксперимента сведены в таблицу 30 приложения А.

Нетрудно заметить, что для магнетрона в прогретом состоянии величина напряжения пятой гармонической составляющей примерно в 5...7 раз больше, чем в непрогретом. В то же время масса нагрузки остается постоянной. Алгоритм управления опорным сигналом компаратора получен по уравнению регрессии, связывающего напряжение пятой гармонической составляющей U_5 с напряжением на выходе датчика температуры U_g . При этом в ходе регрессионного анализа была доказана однородность дисперсий экспериментальных

данных по результатам сравнения критериев Кохрена 23 для каждого магнетрона ($G_1 = 7,6 \cdot 10^{-2}$ $G_2 = 5,2 \cdot 10^{-2}$ и $G_3 = 5,4 \cdot 10^{-2}$) с его критическим значением $G_{кр} = 1,6 \cdot 10^{-1}$.

Уравнение регрессии исследуемого процесса имеет вид:

$$U_5 = aU_g^2 + bU_g + c$$

где a, b, c – коэффициенты, определенные методом наименьших квадратов.

В результате расчетов для каждого магнетрона получены следующие коэффициенты:

$$a_1 = 2,09 \cdot 10^{-1}; a_2 = 2,603 \cdot 10^{-1}; a_3 = 5,460$$

$$b_1 = -1,656; b_2 = 3,277 \cdot 10^{-1}; b_3 = 1,005 \cdot 10^{-1}$$

$$c_1 = 4,362; c_2 = -2,707 \cdot 10^{-1}; c_3 = 6,081 \cdot 10^{-1}$$

С помощью критерия Фишера доказано, что полученные уравнения регрессии адекватно описывают зависимости напряжения пятой гармонической составляющей от напряжения на выходе датчика 2 температуры ($F_1 = 4,87 \cdot 10^{-1}$; $F_2 = 4,38 \cdot 10^{-1}$; $F_3 = 3,87 \cdot 10^{-1}$; $F_{кр} = 1,54$). Полученные уравнения регрессии описывают статическую характеристику $U_5 = f(U_g)$ или $Y = f(U_5)$, реализуемую усилительно-преобразующим элементом, который включает в себя три параллельные цепочки: aU_g^2 , bU_g и c .

Для исключения влияния температурного дрейфа параметров магнетрона предложены более сложные схемы устройств защиты, вошедшие в состав микроволновой установки. При нагреве магнетрона напряжение пятой гармонической составляющей возрастает. Одновременно по тому же закону возрастает и напряжение на выходе усилительно-преобразующего элемента. При этом разность напряжений, поступающих на входы информативного и опорного сигналов компаратора, остается постоянной. Охлаждение магнетрона также не вызывает изменение разности напряжений. В случае возникновения аварийного режима происходит рост исключительно напряжения пятой гармонической составляющей. При этом вне зависимости от температуры изме-

няется разность напряжений на входах информативного и опорного сигналов компаратора.

Наблюдение за осциллограммами кривых тока в цепи анодного питания магнетрона показало, что на протяжении относительно длительного интервала времени (продолжительностью 10...25 периодов питающего напряжения) кривые тока на некоторых участках проявляют аномальные свойства. Эти свойства выражаются в нетипичной для нормального или аварийного режима форме. Вследствие высокой чувствительности устройств защиты наличие таких нетипичных участков вызывает их ложное срабатывание. Для исключения влияния этих аномалий на результат автоматического распознавания аварийного режима разработана микроволновая установка с регулируемой мерой строгости оценки замеров посредством подсчета количества нетипичных участков и сопоставления полученного значения с эталоном. Реализация автоматического анализа формы кривой тока осуществляется в дискретной форме. При этом амплитуды полученных импульсов сравниваются заданным уровнем, а затем осуществляется подсчет аномальных участков и принятие решения. Работа цифрового устройства защиты иллюстрируется временными диаграммами в нормальном и аварийном режимах, представленными на рисунках 19 и 20 приложения Б.

На основе обнаруженной и исследованной зависимости формы кривой анодного тока в цепи питания магнетрона от наличия нагрузки в рабочей камере были разработаны, запатентованы, изготовлены и испытаны устройства защиты, описанные в [14, 16, 19, 23, 198, 183, 62].

4.2.5 Распознавание аварийного режима по уровню низкочастотного излучения

Следует признать, что все вышерассмотренные устройства защиты необходимо включать в разрыв цепи питания СВЧ-генераторов, что не всегда удобно, технологично и безопасно. Поэтому дальнейшие исследования были

направлены на поиск способов распознавания аварийных режимов без электрической связи со схемой микроволновой установки.

В процессе экспериментальной работы с СВЧ-генераторами было замечено, что при возникновении аварийного режима повышается уровень низкочастотного излучения вне рабочей камеры (в окрестности магнетрона, а точнее, в окрестности цепи его питания). При этом в зависимости от места расположения измерителя уровень излучения может меняться на 40...50%. При питании магнетрона однополярным выпрямленным напряжением частота рассеянного излучения в основном соответствует третьей и пятой гармоникам и в меньшей степени – первой гармонике. Обнаруженное явление оказалось достаточно стабильным и вполне пригодным для построения на его основе устройств защиты СВЧ-генераторов от аварийных режимов [170, 26]. Ряд разработанных и испытанных устройств защиты продемонстрировал удовлетворительные показатели, которые определили возможность их использования в микроволновых установках широкого назначения.

Функциональная схема первой из ряда таких установок представлена на рисунке 23 приложения В [19]. При автоматическом анализе режима работы микроволновой установки аварийный режим успевает проявиться серией импульсов, формируемых фильтром 8 низких частот, и вызвать появление логической единицы на выходе триггера 12 (при малой вероятности ложного срабатывания).

По сравнению с устройствами защиты, включаемыми в разрыв цепи анодного питания магнетрона, рассматриваемое техническое решение реализуется упрощенной схемой, в которой исключена электрическая связь с высоковольтной цепью анодного питания; и ложные срабатывания устройства защиты при отклонении напряжения питания от нормального.

Простое техническое решение по выявлению аварийного режима основано на эффекте ионизации рабочего объема газоразрядной лампы низкого давления [330]. К преимуществам этого решения также относятся отсутствие необходимости индивидуальной настройки каждого устройства защиты ввиду раз-

броса технологических параметров магнетронов и простая индикация аварийного режима. Функциональная схема соответствующей микроволновой установки представлена на рисунке 24 приложения В а ее принципиальная электрическая схема – на рисунке 25 приложения В [169].

При возникновении аварийного режима несогласованность СВЧ-генератора 1 с нагрузкой возрастает, а напряженность поля, обусловленная низкочастотной составляющей, повышается на 25...35%. Пространство внутри первичного преобразователя 4 ионизируется. Под действием электрического напряжения сети по первичному преобразователю 4 начинает протекать ток. Газоразрядная лампа ярко вспыхивает, однако протекающий через нее, через резистор 6 (*R7*) и обмотку реле 7 (*KVI*) электрический ток вызывает срабатывание последнего, после чего СВЧ-генератор обесточивается.

4.2.6 Емкостный метод распознавания аварийного режима

Несмотря на очевидные преимущества и реализуемость описанных способов распознавания аварийных режимов поиск более простых, но не менее информативных приемов постоянно продолжается. Целесообразность таких исследований определяется следующими обстоятельствами:

- При нагреве магнетрона происходит существенное изменение его параметров. В связи с этим изменяется величина э.д.с., наводимая в воспринимающем органе (катушке индуктивности).
- Величина э.д.с., соответствующая нормальному режиму при прогревом магнетроне, в отдельных случаях может превысить величину э.д.с., соответствующую аварийному режиму при непрогревом магнетроне. В результате питание СВЧ-генератора либо отключится при нормальном режиме, либо не отключится при аварийном. В то же время технические решения по температурной компенсации изменений параметров магнетронов достаточно сложны и, в свою очередь, требуют точной настройки.
- Параметры магнетрона, используемых в установках для СВЧ-обработки, обладают значительным технологическим разбросом. Поэтому при одном и том

же режиме работы величина э.д.с., наводимая в воспринимающем органе, для разных экземпляров однотипных магнетронов, будет различной. Для обеспечения работоспособности СВЧ-установки необходимо проводить трудоемкие наладочные работы на каждом аппарате.

– В процессе длительной эксплуатации или хранения магнетрона его параметры несколько изменяются. Вследствие этого для сохранения работоспособности СВЧ-установки необходимо производить ее периодическое техническое обслуживание. Это обслуживание заключается в корректировке порога срабатывания реле и является трудоемкой процедурой, требующую высокую квалификацию наладчика.

– При понижении напряжения питания в аварийном режиме автоматическое отключение СВЧ-генератора затруднительно, поскольку величина э.д.с., наводимая в воспринимающем органе, окажется меньше величины э.д.с., соответствующей нормальному режиму при номинальном напряжении питания.

Следующее техническое решение основано на зависимости величины электрической емкости между разделенными стенками объемного резонатора от наличия между ними обрабатываемых продуктов [308, 305]. Резонатор 2 выполнен в виде полого параллелепипеда, разделенного на две части, совмещенные друг с другом по плоскости разделения и не соприкасающиеся между собой (рисунок 26 приложения В). Расстояние между совмещенными частями резонатора 2 не должно превышать четверти длины волны электромагнитной энергии, вырабатываемой СВЧ-генератором 1. Совмещенные части резонатора 2 образуют электрический конденсатор с емкостью, величина которой зависит от диэлектрических параметров среды внутри резонатора 2. Индуктивность $L1$ катушки 2 составляет величину, определяющую возникновение резонанса напряжений в цепи последовательно соединенных с ней частями резонатора 2 при отсутствии в нем обрабатываемых продуктов. Если частота переменного напряжения, вырабатываемого высокочастотным генератором 6, составляет 30 кГц, а величина электрической емкости, образуемой между частями резонато-

ра 2 при отсутствии в нем продуктов, равна 20 пФ, величина индуктивности $L1$ катушки 3 определяется условием:

$$\omega L1 = \frac{1}{\omega C1}, \quad (4.47)$$

где $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 30 \cdot 10^3 = 18,8$ кГц.

Откуда

$$L1 = \frac{1}{\omega^2 C1} = \frac{1}{(18,8 \cdot 10^2)^2 \cdot 20 \cdot 10^{-12}} = 1,41 \text{ Гн}$$

Дальнейшая последовательность работы установки зависит от наличия нагрузки (обрабатываемых продуктов) внутри резонатора.

На рисунке 27 приложения В представлены временные диаграммы работы микроволновой установки при нормальном и аварийном режимах соответственно. При отсутствии обрабатываемых продуктов (при аварийном режиме) величина электрической емкости, образуемой между частями резонатора 2 уменьшается. В цепи последовательно соединенных частей резонатора 2 и катушки 3 индуктивности ($L1$) возникает резонанс напряжений. Вследствие этого напряжение на катушке 3 индуктивности ($L1$), а, следовательно, и на входе усилителя 4 мощности резко возрастает. Величина напряжения на выходе усилителя 4 мощности и подаваемого на катушку реле 5 ($K3$) превысит порог срабатывания последнего. Реле 5 ($K3$) срабатывает, размыкающий контакт ($K3.1$) реле 5 ($K3$) размыкается и все элементы установки обесточиваются.

Описанное устройство защиты (устройство для определения наличия продуктов в микроволновом резонаторе) обеспечивает достаточно надежную работу СВЧ-генератора благодаря своевременному обнаружению аварийного режима и автоматическому отключению питания при прогревом и непрогревом магнетрона [330]. Одновременно это техническое решение повышает достоверность получения информации о заполнении резонатора при изменении параметров магнетрона в результате его длительной эксплуатации, а также при изменении напряжения питания.

4.3 Стабилизация параметров СВЧ электромагнитного поля при меняющейся массе обрабатываемого материала

4.3.1 Разработка алгоритма управления микроволновым генератором

Изменение массы обрабатываемых материалов в микроволновых установках малой мощности оказывает влияние на интенсивность СВЧ-воздействия, что требует применение обратной связи по коррекции режима работы генератора. Формальная запись алгоритма управления СВЧ-генератором на основании второго уравнения совокупности (2.1) будет иметь вид:

$$k_1 \frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{M - k_6}{k_5 \xi}$$

Перестройка режима работы микроволнового генератора при меняющейся массе обрабатываемых продуктов позволит сберечь энергию, а также уменьшить долю некачественно обработанного материала.

Стабилизация параметров СВЧ электромагнитного поля при меняющейся массе обрабатываемого материала может быть осуществлена посредством перестройки работы СВЧ-генератора [33, 196]. Применительно к микроволновому генератору КБН - 82 это достигается регулированием напряжения в цепи анодного питания магнетрона. Регулирование напряжения можно производить вручную, с помощью многопозиционного переключателя или автотрансформатора, или автоматически, при использовании регулятора и управляемого сопротивления.

Для выявления зависимости напряженности поля от режима работы СВЧ-генератора и массы обрабатываемого материала проведен двухфакторный эксперимент, в ходе которого осуществлялось варьирование напряжением на первичной обмотке повышающего трансформатора $T3$ в цепи анодного питания магнетрона VL в пределах от 140 до 220 В и массой в пределах от 75 до 400 г [126]. Объектом воздействия являлась вода, содержащаяся в мерной цилиндрической стеклянной емкости массой 110 г, помещенной в центр рабочей камеры на высоте 100 мм. Напряженность поля оценивалась по количеству энергии, выделяемой в виде тепла в единице массы обрабатываемого материала.

ла при воздействии СВЧ-поля в течение 40 с [75]. Это количество энергии определялось в соответствии с выражением:

$$D = C(T_{\text{н}} - T_{\text{к}}) \quad (4.48)$$

где $T_{\text{н}}$ и $T_{\text{к}}$ – начальная и конечная температуры воды соответственно, °С; C – теплоемкость воды, $C=4,19$ кДж/кг·град.

Результаты эксперимента сведены в таблицу 31 приложения А. По данным эксперимента найдена эмпирическая зависимость $D = f(m; U)$. Поскольку влияние каждого из исследуемых факторов явно нелинейно, определение эмпирической зависимости осуществлялось в два этапа: На первом из них производился поиск модели вида $D = f_1(a, b, m)$ при $U=140; 160; 180; 200; 220$ В, на втором – поиск моделей $a = f_2(c; d; U)$ и $b = f_3(f; e; U)$, где a, b, c, d, e, f – параметры эмпирических формул.

Выбор вида эмпирической зависимости производился из условия максимальной точности воспроизведения экспериментальных данных при минимальном количестве входящих в нее параметров [249, 253]. В процессе выбора эмпирической формулы были рассмотрены следующие двухпараметрические функции

1. Линейная $D = am + b$
2. Показательная $D = ab^m$
3. Дробно-рациональная $D = \frac{1}{am+b}$
4. Логарифмическая $D = a \ln m + b$ (4.52) .
5. Степенная $D = am^b$
6. Гиперболическая $D = a + \frac{b}{m}$
7. Сложная дробно-рациональная. $D = \frac{m}{am+b}$.

При этом были выполнены следующие промежуточные вычисления. Массив экспериментальных данных из таблицы 31 приложения А представлялся точками в координатных осях D и m , как показано на рисунке 21 приложения Б. Отложенные точки соединялись произвольными кривыми до получения графика $D = f(\Phi)$. На заданном отрезке изменения незави-

симой переменной (массой) выбирались крайние точки $m_1 = 75$ г и $m_2 = 400$ г, по которым определялись их среднее арифметическое $m_{\text{ср}} = \frac{m_1+m_2}{2}$, среднее геометрическое $m_{\text{геом}} = \sqrt{m_1 m_2}$ и среднее гармоническое $m_{\text{гарм}} = \frac{2m_1 m_2}{m_1+m_2}$. В соответствии с вычисленными значениями независимой переменной по графику на рисунке 21 приложения Б определялись значения зависимой переменной (дозы) D_1, D_2 и D_3 .

Для значений зависимой переменной D_1 и D_2 , соответствующих точкам m_1 и m_2 , рассчитывались их среднее арифметическое $D_{\text{ар}} = \frac{D_1+D_2}{2}$, среднее геометрическое $D_{\text{геом}} = \sqrt{D_1 D_2}$ и среднее гармоническое $D_{\text{гарм}} = \frac{2D_1 D_2}{D_1+D_2}$. В результате сравнения значений зависимой переменной, найденных из графика рис.6.1: D_1^x, D_2^x и D_3^x с вычисленными значениями $D_{\text{ср}}, D_{\text{геом}}$ и $D_{\text{гарм.}}$, определены величины ошибок ϵ_i как $\epsilon_1 = |D_1^x - D_{\text{ср}}|$, $\epsilon_2 = |D_2^x - D_{\text{ср}}|$, $\epsilon_3 = |D_3^x - D_{\text{ср}}|$, $\epsilon_4 = |D_4^x - D_{\text{ср}}|$, $\epsilon_5 = |D_5^x - D_{\text{ср}}|$, $\epsilon_6 = |D_6^x - D_{\text{ср}}|$, $\epsilon_7 = |D_7^x - D_{\text{ср}}|$.

Вид эмпирической зависимости из совокупности (4.52) определялся по номеру минимальной ошибки ϵ_{min} из ряда $\epsilon_1 \dots \epsilon_7$. Максимальную точность воспроизведения экспериментальных данных для большинства исследуемых напряжений обеспечивает гиперболическая функция $D = a + \frac{b}{m}$. Параметры a и b , найденные для нее методом наименьших квадратов, помещены в таблицу 32 приложения Б.

Аналогичным образом определялись формулы для описания нелинейных зависимостей $a = f_2(c, d, U)$ и $b = f_3(e, f, U)$ в виде гиперболических функций $a = c + \frac{d}{U}$ и $b = e + \frac{f}{U}$. Графические зависимости $a = \varphi_1(U)$ и $b = \varphi_2(U)$ представлены на рисунке 22.а и рисунке 22.б приложения А соответственно. Значения параметров c, d, e и f , вычисленные методом наименьших квадратов, оказались равными 47,49; $-5,439 \cdot 10^3$; $3,764 \cdot 10^4$ и $-4,565 \cdot 10^6$.

Таким образом, эмпирическая зависимость $D = f(U; m)$ имеет вид

$$D = 47,49 - \frac{5439,66}{U} + \frac{37648,33 - \frac{4564712,3}{U}}{m}. \quad (4.49)$$

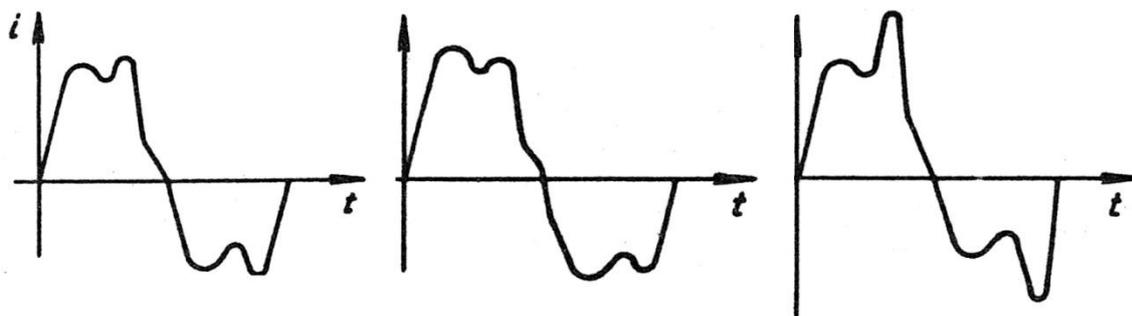
Полученная зависимость удовлетворительно воспроизводит исходные данные при средней погрешности 14,7%. В результате преобразования последнего выражения относительно U получим:

$$U = \frac{5,4 \cdot 10^3 \cdot -4,56 \cdot 10^6}{3,7 \cdot 10^4 - (D - 47,49) \cdot m}. \quad (4.50)$$

Последнее выражение представляет собой алгоритм управления СВЧ-генератором для обеспечения обработки материалов требуемой дозой энергии в пределах от 20 до 220 кДж/кг при их массе от 75 до 400 г. Для обеспечения оперативной реализации разработанного алгоритма при ручном управлении СВЧ-генератором построена номограмма, представленная на рисунке 23 приложения Б. Техническая реализация рассмотренного принципа управления режимами работы СВЧ-генератора может быть осуществлена на микроволновой установке, функциональная схема которой представлена на рисунке 28 приложения В [13].

В разработанной установке использована зависимость формы кривой тока в цепи анодного питания магнетрона от массы обрабатываемых материалов.

Для иллюстрации принципа действия микроволновой установки на рисунке 4.10 представлены осциллограммы тока в анодной цепи при номинальной (нормальной) нагрузке (а), при перегрузке (б) и при недогрузке (в) СВЧ-генератора. Для этих же режимов на рисунке изображены пятая и седьмая гармонические составляющие тока в цепи анодного питания магнетрона.



а

б

в

Рисунок 4.10 – Осциллограммы тока в анодной цепи питания магнетрона при номинальной нагрузке (а), при перегрузке (б) и при недогрузке (в) СВЧ-генератора

При питании магнетрона 1 однополупериодным переменным напряжением ток в анодной цепи и напряженность поля в рабочей камере 2 зависят от геометрических размеров рабочей камеры 2, устройства возбуждения, диэлектрических характеристик обрабатываемых материалов и степени загрузки рабочей камеры 2. Для оптимальной обработки материалов необходимо поддерживать в заданных границах дозу его облучения, которая обусловлена как напряженностью поля в рабочей камере 2, так и продолжительностью воздействия.

Степень заполнения рабочей камеры 2 влияет на напряженность поля и форму тока в анодной цепи магнетрона 1, в частности, определяет соотношение гармоник, что видно по рисункам 24, 25 и 26 приложения Б. Сигнал с выхода магнетрона 1 через первый усилитель 3 поступает на входы первого и второго избирательных усилителей, которые выделяют и усиливают сигналы пятой и седьмой гармоник тока. С этой целью в избирательных усилителях применены полосовые фильтры 6 и 13, настроенные соответственно на пятую и седьмую гармоники. Для подавления сигнала первой гармоники применен первый 4 и второй 11 режекторные фильтры. Первый 8 и второй 10 детекторы выпрямляют сигналы с выходов первого и второго избирательных усилителей. Сигналы с выходов детекторов 8 и 10 суммируются на выходе сумматора 9 с весами, определяемыми для каждой конкретной установки. Сигнал на выходе сумматора 9 изменяется при изменении степени загрузки рабочей камеры 2. При недогрузке рабочей камеры 2 сигнал приводит к формированию управляющего воздействия регулятором 16, которое уменьшает амплитуду напряжения в анодной цепи в соответствии с алгоритмом 3.54. В свою очередь, пе-

регрузка определяет появление сигнала на выходе сумматора 9 увеличивающего амплитуду напряжения в анодной цепи.

Разработанный принцип управления микроволновым генератором использован в ряде установок для обработки сельскохозяйственных материалов энергией СВЧ-электромагнитного поля [8, 22, 24].

4.3.2 Совершенствование промышленных микроволновых установок периодического действия

В настоящее время для реализации целенаправленного СВЧ-воздействия на небольшое количество сельскохозяйственных материалов наиболее часто используют бытовые микроволновые печи. Основное назначение этих печей сводится к приготовлению или разогреву пищевых продуктов. Микроволновые печи в широком ассортименте поступают в розничную торговую сеть и отличаются друг от друга, в основном, дизайном, дополнительными функциями, а также органами сигнализации и управления. Конструкторы микроволновых печей бытового назначения не ставили перед собой задачу обеспечения точности дозирования СВЧ-воздействия, вследствие чего при использовании этих приборов для «тонких» операций (предпосевной обработки семян, воздействия на пораженных варроатозом пчел и др.) отклонение дозы облучения может оказаться недопустимо большим.

Для обеспечения возможности использования микроволновых печей в производственных целях, в их конструкции предлагается внести ряд изменений. Эти изменения решают три задачи: повышают точность дозирования СВЧ-обработки; обеспечивают защиту СВЧ-генератора от аварийных режимов; позволяют регулировать интенсивность воздействия в широких пределах.

Поскольку принцип действия современных микроволновых печей, их конструкции и основные элементы электрических схем одинаковы, рассмотрим предлагаемые изменения на примере СВЧ-генератора КБН-82. Функциональная схема переоборудованной микроволновой установки периодического дей-

ствия представлена на рисунке 29 приложения В, а ее принципиальная электрическая схема – на рисунке 30 приложения В.

По сравнению с промышленным образцом усовершенствованная микроволновая установка [155] дополнена системой охлаждения, включающей следующие элементы: расширительный бак 1, насос 2, металлические штуцеры 3, балластную емкость 4, радиатор 5 и вентилятор 6. Балластная емкость 4 представляет собой полый параллелепипед из органического стекла. Балластная емкость 4 располагается в центре рабочей камеры, на высоте 7...12 см от нижнего основания, а ее внутренний объем должен составлять, как минимум, 200...300 см³. Крепление балластной емкости 4, а также ее связь с системой охлаждения осуществляется с помощью металлических штуцеров 3, установленных на задней стенке рабочей камеры. Система охлаждения заливается водой и имеет полный объем 7 л.

При работе переоборудованной микроволновой установки обрабатываемые материалы располагаются на поверхности балластной емкости 4. Внутри системы охлаждения, которая включается одновременно с СВЧ-генератором, циркулирует вода. Нагреваемая вода через один из штуцеров 3 подводится к радиатору 5 и расширительному баку 1. Вентилятор 6 осуществляет принудительное охлаждение воды, которая насосом 2 через второй штуцер 3 вновь подается в балластную емкость 4.

Поскольку зависимость напряженности СВЧ-поля от массы обрабатываемой нагрузки имеет нисходящий экспоненциальный характер (см. рисунок 21 приложения Б), обработку сельскохозяйственных материалов целесообразно производить в ее пологой правой части. В этой области имеет место слабая зависимость напряженности от массы, определяющая возможность менее тщательного выбора режима обработки.

Следует признать, что КПД усовершенствованной микроволновой установки оказывается несколько меньшим, чем у исходного варианта. Это объясняется затратами энергии на нагрев воды в балластной емкости. Однако незначительное снижение КПД (5...9%) компенсируется достижением высокой

точности дозирования. Кроме того, наличие в рабочей камере балластной емкости с минимальным количеством воды исключает возникновение аварийного режима.

Для регулирования мощности, развиваемой СВЧ-генератором, в исходную электрическую схему введен автотрансформатор $T2$, например, ЛАТР-2М с рабочим током 9 А. Дополнение исходной схемы трансформатором $T3$ объясняется необходимостью отделения цепей накала и управления от цепи анодного питания магнетрона.

У трансформатора $T1$ (ТВ.11-1М-220-50), устанавливаемого заводом-изготовителем, используется только одна вторичная обмотка, имеющая напряжение 2200 В (клеммы 7 и 9). Трансформатор $T3$ можно изготовить самостоятельно. Его первичная обмотка, подключаемая к напряжению 220 В, (клеммы 1 и 2) содержит 1650 витков провода диаметром 0,3 мм. Обмотка, обеспечивающая питанием накал магнетрона (клеммы 5 и 6) – 24 витка проводом с диаметром 3 мм. Сечение магнитопровода этого трансформатора должно быть не меньшим 6 см². При изготовлении трансформатора $T3$ следует обратить особое внимание на качество изоляции вторичных обмоток от корпуса и друг от друга, поскольку напряжение между ними может достигать 3,5 кВ. Напряжение на вторичной обмотке трансформатора в цепи анодного питания магнетрона измеряется вольтметром PVI . Это напряжение и определяет мощность, развиваемую СВЧ-генератором, или интенсивность воздействия на обрабатываемые материалы. В переоборудованной микроволновой установке использован центробежный насос типа ЭНСМ-1УХЛ4 с асинхронный электродвигателем $M2$ и вентилятор СД-10А с двигателем $M3$ мощностью 60 Вт.

Выводы по главе 4

1. Аналитический обзор областей применения СВЧ-электротехнологий в АПК позволил сделать вывод об их возрастающей роли в решении задач растениеводства, животноводства, пчеловодства, шелководства, а также хранения и переработки сельскохозяйственных продуктов. Благодаря преимуществам СВЧ-нагрева и специфическому воздействию СВЧ-энергии на материалы биологи-

ческого происхождения эти технологии позволяют достичь высоких количественных и качественных производственных показателей при экологической безопасности и улучшенных условиях труда. Вместе с тем широкое внедрение СВЧ-технологий существенно сдерживается отсутствием достаточно производительных и надежных микроволновых установок, позволяющих производить обработку материалов с высокой точностью дозирования подводимой энергии. Невозможность достижения точного дозирования СВЧ-воздействия в серийных микроволновых установках определяет их повышенную энергоемкость и утрату части обрабатываемых материалов. Кроме того, зависимость эффективности СВЧ-воздействия от массы и диэлектрических свойств обрабатываемых продуктов, а также высокая вероятность появления аварийного режима при их отсутствии в рабочей камере определяют неудобство эксплуатации и требуют повышенного внимания операторов. Таким образом, обоснование режимов СВЧ-воздействия, обеспечивающих точное дозирование подводимой энергии, а также разработка эффективных устройств автоматического отключения СВЧ-генераторов при аварийных режимах, являются важными задачами проблемы энерго-ресурсосбережения,

2. Исследования распределения электрического поля в пространстве рабочей камеры серийной микроволновой установки КБН-82 позволили выявить аналитическую зависимость между требованиями к точности СВЧ-воздействия и эквинапряженным объемом. Установлено, что координаты точки максимальной напряженности СВЧ-поля в объемном резонаторе при размещении начала координат в его дальнем нижнем углу соответствуют следующим значениям: $x = 9,5$ см, $y = 23,7$ см, $z = 19,5$ см. При этом для минимально допустимого значения дозы воздействия 200 кДж/кг радиус эквинапряженного шарообразного пространства составляет 4,2 см, откуда максимальный объем одновременно обрабатываемых материалов соответствует 310 см³. Предложенная методика позволяет анализировать любые микроволновые установки циклического действия и избежать ошибок при обосновании выборе компромисса между производительностью и качеством обработки. Для упрощенных расчетов

можно использовать ускоренную методику, при которой искомый объем определяется суммой одноосных цилиндров, радиусы которых находятся реализацией цифровой модели расширяющейся спирали Архимеда.

3. Для автоматического распознавания аварийных режимов СВЧ-генераторов с последующим отключением питания разработаны несколько вариантов проверенных и запатентованных защитно-отключающих устройств. Принцип действия этих устройств основан на различных физических эффектах с высоким коэффициентом корреляции статистической зависимости результирующего признака от массы обрабатываемых материалов. При выборе защитно-отключающего устройства приоритет определяется уровнем квалификации персонала и технической оснащенности предприятия-изготовителя.

4. Установлено, что загрузка рабочей камеры микроволновой установки существенно влияет на форму тока в цепи питания магнетрона. При нормальном режиме работы СВЧ-генератора форма кривой тока близка к синусоидальной, а при отсутствии нагрузки в рабочей камере она существенно искажается, приобретая на каждом полупериоде двухвершинный характер. Для автоматического анализа формы кривой анодного тока предложены устройства, реагирующие на амплитуду пятой гармонической составляющей. С целью повышения достоверности распознавания аварийного режима разработаны устройства с автоматической компенсацией температурного дрейфа, устройства с одновременным анализом нескольких гармонических составляющих, а также устройство с цифровым принципом обработки информации. Обнаружено и теоретически обосновано изменение уровня низкочастотного электромагнитного фона в окрестности магнетрона при возникновении аварийного режима СВЧ-генератора. На этом эффекте основан принцип действия нескольких предложенных защитно-отключающих устройств. При этом наиболее простое из них предусматривает использование в качестве воспринимающего органа газоразрядной лампы низкого давления, расположенной на периферии рабочей камеры.

Наиболее простой способ автоматического распознавания аварийного режима основан на измерении величины электрической емкости, образуемой между двумя изолированными друг от друга стенками рабочей камеры. Этот способ не требует внесения изменений в схему СВЧ-генератора и может быть реализован практически на любом микроволновом оборудовании

5. Для стабилизации режима работы СВЧ-генератора при меняющейся массе обрабатываемых материалов предложено осуществлять автоматическое управление напряжением в цепи анодного питания магнетрона в соответствии с рассчитанным алгоритмом или ручное управление с помощью построенной номограммы. При СВЧ-обработке материалов в СВЧ-печи циклического действия вовнутрь ее рабочей камеры предложено устанавливать балластную емкость с проточной водой. Эта мера позволяет, с одной стороны, уменьшить погрешность в дозировании СВЧ-воздействия, с другой – предотвратить возникновение аварийного режима при незагруженной рабочей камеры.

Глава 5. Ресурсо-энергосбережение при использовании силовых ветро- энергетических установок

5.1 Оценка параметров многолопастных силовых ветродвигателей с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей

Применительно к ветроэнергетическим установкам первое уравнение совокупности (2.1) преобразуется к виду: $E(t) = k_2 \frac{dx}{dt} \times k_5 \xi + k_4$. В соответствии с утверждением в главе 2 увеличение $E(t)$ за счет множителя $\frac{dx}{dt}$ невозможно, поскольку его искусственное увеличение ограничено требованием выражения (2.4). С целью увеличения объема преобразованной энергии $E(t)$, а потому – сбережения ветрового ресурса, последующие исследования должны быть сосредоточены на создании условий для повышения коэффициента k_5 и уменьшению k_4 .

Настоящий этап исследований посвящен поиску и обоснованию ресурсосберегающих мер при преобразовании кинетической энергии ветра силовыми ветродвигателями. С одной стороны, проблема ресурсосбережения в ветроэнергетике решается повышением эффективности использования ветрового ресурса, то есть увеличением коэффициента использования энергии ветра. Такой результат достигается совершенствованием конструкций преобразователей за счет оптимизации формы и расположения лопастей, использованием современных материалов и широким применением средств автоматики [27]. С другой стороны, в соответствии с положениями, изложенными в первой главе настоящей диссертации, проблема ресурсосбережения в ветроэнергетике неизбежно связана с экономией пространства, занимаемого ветродвигателями, а также с пространством, где расположение аналогичных устройств невозможно. По отношению к ветродвигателям, использующих силовые свойства ветра (силовым ветродвигателям), указанные направления дополняются необходимостью разработки теории взаимодействия ветрового потока с лопастями, методики оценки мощности и коэффициента использования энергии ветра ветродвигателями с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей,

а также совершенствованию конструкций преобразователей. Принимая во внимание специфические особенности силовых ветродвигателей, а также недостаточную разработку теоретических вопросов по взаимодействию ветрового потока с подвижными элементами их конструкций, можно заключить, что решение поставленной задачи требует проведения следующих работ: оценку параметров многолопастных силовых ветродвигателей, а также ветродвигателей с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей, разработку методики определения коэффициента использования энергии ветра силовыми ветродвигателями, определение мер повышения их эффективности, обоснование способов уравнивания конструкций со взаимно-перпендикулярными валами, а также минимизации межосевого расстояния двухосевых силовых ветродвигателей.

Находясь в зоне действия ветра, лопасти силовых ветродвигателей проходят положение, где их плоскости перпендикулярны направлению ветра. В этот момент использование кинетической энергии движущихся воздушных масс максимально. При выходе из подветренной зоны, активная поверхность (поверхность, подвергающаяся прямому давлению ветра), существенно сокращается. Поэтому встречный поток практически не оказывает тормозящего действия. Повернувшись на половину оборота, лопасти снова оказываются в зоне положительного действия ветра. При этом активная поверхность лопастей увеличивается, и цикл повторяется. Длительность этих циклов находится в обратной зависимости от частоты вращения лопастей. Последняя, в свою очередь, является функцией скорости ветра и может быть вычислена по известным формулам [361].

Более сложной задачей является оценка мощности, развиваемой ветродвигателем. На рисунке 5.1 показано положение лопасти такого ветродвигателя в моменты времени, обозначенные символами A_1 и A_2 , A_3 и A_4 . Очевидно, что по отношению к ветровому потоку, исходящего из точки N , активная поверхность лопасти является переменной величиной. Например, в момент A_1 активная поверхность равна нулю, в момент A_2 она возрастает, в момент A_3 дости-

гает максимума, а в момент A_4 вновь убывает. Таким образом, $0 \leq S(t) \leq S_{л}$, где $S(t)$ – активная поверхность лопасти; $S_{л}$ – геометрическая площадь лопасти; t – текущее время. С другой стороны, максимальная активная поверхность лопасти приходится на тот момент, когда ветровой поток направлен к ней по нормали.

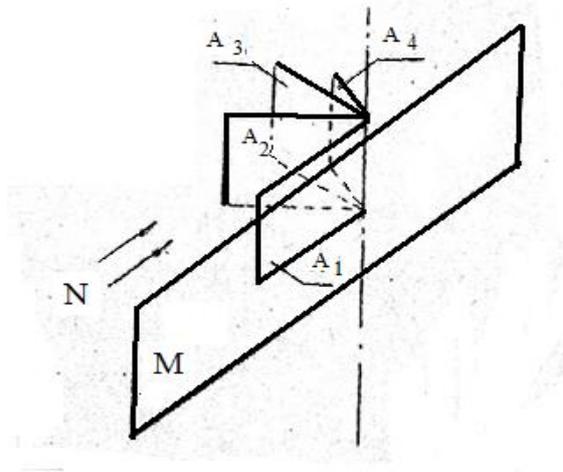


Рисунок 5.1 – Расположение лопасти ветродвигателя в различные моменты времени

Примечательно, что с противоположной стороны условной плоскости M (на интервале от π до 2π) активная поверхность лопасти во всех точках будет близка к нулю. Это происходит вследствие того, что на рассматриваемом участке лопасть оказывается автоматически повернутой и обращенной к ветру достаточно тонкой гранью.

Для определения мощности силового многолопастного ветродвигателя была рассмотрена его модель замещения, изображенная на рисунке 5.2а. В этой модели использована схема обычного многолопастного ветродвигателя с жестко закрепленными лопастями. Лопасти модели имеют форму прямоугольных лопаток (см. рисунок 5.2б), расположенных на одной оси, но на разных уровнях. Это условие обеспечивает свободное взаимодействие ветрового потока со всеми лопастями и исключает взаимное их «загораживание». [131,146] Направление ветра в модели замещения показано стрелками. Для предотвращения тормозящего эффекта на пути ветрового потока в первом и четвертом квадрантах установлен экран L . При анализе работы ветродвигателя были

приняты следующие обозначения: ω – круговая частота вращения лопасти, рад/с; α – угол между соседними лопастями, рад; R – радиус ветродвигателя (расстояние от центра до конца лопасти), м; h – «ширина» лопасти (протяженность стороны лопасти, параллельной общей оси, м; n – количество пар лопастей (количество лопастей, находящихся на интервале π). Принимая во внимание, что мощность ветродвигателя пропорциональна активной поверхности лопастей [270], оценка этой величины произведена для модели замещения.

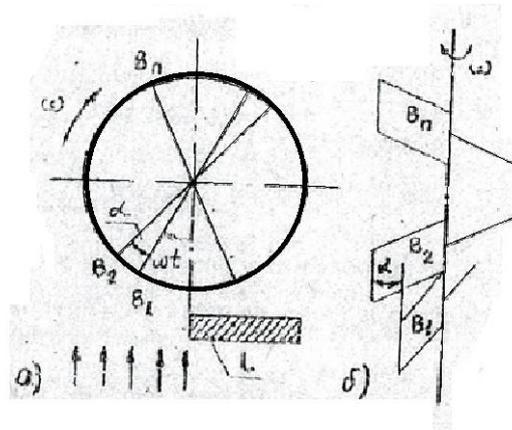


Рисунок 5.2 – Модель замещения лопастей

Величина активной поверхности лопасти B_1 может быть записана как $S_{B_1} = hR \sin \omega t$, где произведение ωt определяет угол поворота лопасти относительно направления ветра. Аналогично для лопастей $B_2, B_3 \dots B_n$

$S_{B_2} = hR \sin (\omega t + \alpha), \quad S_{B_3} = hR \sin (\omega t + 2\alpha), \dots, S_{B_n} = hR \sin [\omega t + (n - 1)\alpha]$. Суммируя, найдем общую активную поверхность лопастей ветродвигателя:

$$S = hR \{ \sin \omega t + \sin [\omega t + \alpha] + \sin [\omega t + 2\alpha] + \dots + \sin [\omega t + (n - 1)\alpha] \}$$

$$\text{или } S = hR \sum_{i=1}^n \sin [\omega t + (i - 1)\alpha] \quad (5.1)$$

Функция (5.1) является периодической. Для условий $n = 3, h = 1$ и $R = 1$ график изменения активной поверхности лопастей ветродвигателя будет иметь вид, представленный на рисунке 5.3. При перемещении какой-либо лопасти из второго квадранта в первый, противоположный ее конец перемещается из четвертого квадранта в третий. Поэтому любой отрицательной составляющей, появляющейся в выражении (5.1), следует присваивать положитель-

ный знак и рассматривать ее как атрибут лопасти, находящейся во втором или третьем квадранте. Математически это легко достигается введением в выражение (5.1) n модулей.

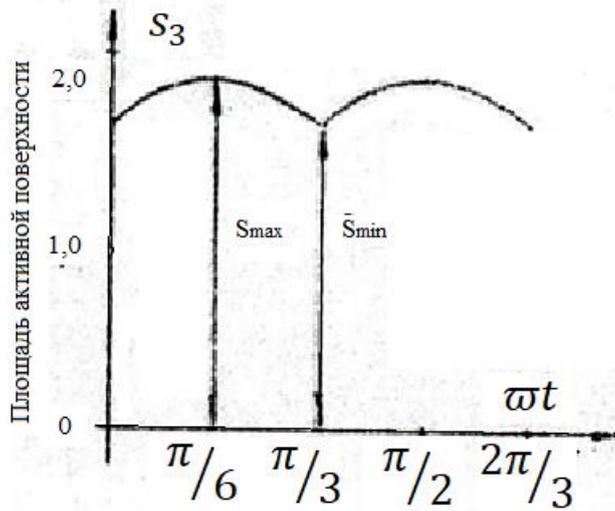


Рисунок 5.3 – График изменения активной поверхности лопастей

$$S = hR\{|\sin\omega t| + |\sin[\omega t + \alpha]| + |\sin[\omega t + 2\alpha]| + \dots + |\sin[\omega t + (n - 1)\alpha]|\}$$

или

$$S = hR \sum_{i=1}^n |\sin[\omega t + (i - 1)\alpha]| \quad (5.2)$$

Выражение (4.2) описывает процесс изменения суммарной активной поверхности при любых t . В то же время рассмотрение функции $S(\omega t)$ при больших t (то есть при $\omega t > \pi$) нецелесообразно. Ввиду периодичности этой функции принято решение ограничиться одним периодом. Причем, с возрастанием количества пар лопастей длительность периода уменьшается. В работе [146] определены основные характеристики функции $S(\omega t)$ для ветродвигателей с различным n .

1. Ветродвигатель с одной парой лопастей: $n = 1$; $\alpha = \pi$.

$$S_1 = hR|\sin\omega t| \quad (5.3)$$

$$S_2 = S_{1 \max} \text{ при } \omega t = \pi/2; \text{ при } h = R = 1 \text{ и } S_{1 \max} = 1$$

$$S_1 = S_{1 \min} \text{ при } \omega t = 0; \text{ при } h = R = 1 \text{ и } S_{1 \min} = 0$$

$$T_1 = \pi$$

2. Ветродвигатель с двумя парами лопастей: $n = 2$; $\alpha = \pi$

$$S_2 = hR [|\sin\omega t| + |\sin(\omega t + \alpha)|] \quad (5.4)$$

Для учета функции модулей, выражение (4.4) проанализировано по частям:

$$S_{21} = hR[\sin\omega t + \sin(\omega t + \alpha)] \text{ при } 0 < \omega t \leq \pi/2$$

$$S_{22} = hR[\sin\omega t - \sin(\omega t + \alpha)] \text{ при } \pi/2 < \omega t \leq \pi$$

Найдем значения аргументов ωt , при которых функции S_{21} и S_{22} максимальны. Для этого, применяя тригонометрические преобразования сумм синусов, сделаны записи:

$$S_{21} = 2\sin\frac{\omega t + \omega t + \alpha}{2}\cos\left(-\frac{\alpha}{2}\right) \text{ и } S_{22} = 2\cos\frac{\omega t + \omega t + \alpha}{2}\sin\left(-\frac{\alpha}{2}\right).$$

Откуда $\omega t = \pi/4$

$$S_{22} = S_{22 \max} \text{ при } \omega t + \frac{\pi}{4} = \pi \text{ и } \omega t = \frac{3}{4}$$

В результате деления величины периода между двумя максимумами на 2, найдено значение аргумента, при котором функция (5.4) максимальна:

$$\omega t = \frac{\frac{3}{4}\pi - \pi/4}{2} = \pi/2$$

Экстремальные значения функции (4) при $h = R = 1$:

$$S_{2 \max} = \sin\frac{\pi}{4} + \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2}\right) = \sqrt{2}, \quad S_{2 \min} = \sin\frac{\pi}{2} + \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) = 1$$

$$T_2 = \pi/2$$

3. Ветродвигатель с тремя парами лопастей: $n = 3$; $\alpha = \pi/3$.

Для исследования функции (5.2) при $n = 3$ вышеизложенная методика становится неудобной. В связи с этим использован другой подход к определению значений периодической функции. Этот подход является более общим и пригоден для изучения ветродвигателей с различным количеством пар лопастей.

Таким образом, при $n = 3$

$$S_3 = hR[|\sin\omega t| + |\sin(\omega t + \alpha)| + |\sin(\omega t + 2\alpha)|] \quad (5.5)$$

В результате введения ограничения: $\omega t \leq \pi/3$ сформирована запись:

$$S_3 = hR[\sin\omega t + \sin(\omega t + \alpha) + \sin(\omega t + 2\alpha)]$$

Или

$$S_3 = hR[\sin\omega t + \sin\omega t \cdot \cos\omega t - \sin\omega t \cdot \cos\omega t + \sin\omega t \cdot \cos 2\alpha - \sin 2\alpha \cdot \cos\omega t] \quad (5.6)$$

В результате группирования слагаемых выражения (4.6) относительно $\sin\omega t$ и $\cos\omega t$ получено::

$$S_3 = hR[\sin\omega t(1 + \cos\alpha + \cos 2\alpha) - \cos\omega t(\sin\alpha + \sin 2\alpha)] \quad (5.7)$$

После введения обозначений: $a(\alpha) = \sin\alpha + \sin 2\alpha$; $b(\alpha) = 1 + \cos\alpha + \cos 2\alpha$ выражение (5.7) сведено к виду:

$$S_3 = hR[b(\alpha)\sin\omega t - a(\alpha)\cos\omega t] \quad (5.8)$$

Пусть $c(\alpha) = \sqrt{a^2(\alpha) + b^2(\alpha)}$

Поделим правую и левую части выражения (4.8) на $c(\alpha)$:

$$\frac{S_3}{c(\alpha)} = hR \left[\frac{b(\alpha)}{c(\alpha)} \sin\omega t - \frac{a(\alpha)}{c(\alpha)} \cos\omega t \right] \quad (5.9)$$

Но из прямоугольного треугольника с катетами $a(\alpha)$ и $b(\alpha)$ и гипотенузой $c(\alpha)$ можно записать:

$$\frac{a(\alpha)}{c(\alpha)} = \sin\varphi(\alpha); \quad \frac{b(\alpha)}{c(\alpha)} = \cos\varphi(\alpha) \quad (5.10)$$

С учетом разности (5.9) выражение (5.10) представлено следующим образом:

$$\frac{S_3}{c(\alpha)} = hR[\sin\varphi(\alpha) \cdot \cos\omega t + \cos\varphi(\alpha)\sin\omega t]$$

Или $S_3 = c(\alpha)hR\sin[\omega t + \varphi(\alpha)]$ при $0 \leq \omega t \leq \pi/3$

Область изменения S_3 находится в пределах от нуля до $c(\alpha)hR$. Поэтому, определив величину $\varphi(\alpha)$, из выражения (5.10) найдено искомые значения аргумента ωt .

$$\text{Итак, } a(\alpha) = \sin\alpha + \sin 2\alpha = \sin \pi/3 + \sin \frac{2\pi}{3} = \sqrt{3} = 1,732$$

$$b(\alpha) = 1 + \cos \alpha + \cos 2\alpha = 1 + \cos \frac{\pi}{3} + \cos \frac{2\pi}{3} = 1$$

$$\varphi(\alpha) = \arctg \frac{a(\alpha)}{b(\alpha)} = \arctg \sqrt{3} = \pi/3, \quad c(\alpha) = \sqrt{(\sqrt{3})^2 + 1} = 2$$

$$S_3 = S_{3 \max} \text{ при } \omega t = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{3} = \frac{\pi}{6}$$

Предположим, что период функции (5.5) составляет величину $\pi/3$. Для доказательства этого предположения дадим приращение аргументу в составе функции (5.5) на величину $\pi/3$. Если наше предположение верно, то полученное выражение должно быть эквивалентно исходному.

$$\text{Итак, } S_3 = hR \left[\left| \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{3} \right) \right| + \left| \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) \right| + \left| \sin(\omega t + \pi) \right| \right] \quad (5.11)$$

Но $|\sin(\omega t + \pi)| = |\sin \omega t|$, следовательно:

$$S_3 = hR \left[\left| \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{3} \right) \right| + \left| \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) \right| + |\sin \omega t| \right] \quad (5.12)$$

Выражения (5.5) и (5.12) эквивалентны, что достаточно для утверждения о равенстве периода исследуемой функции величине $\pi/3$.

$$S_3 = S_{3 \min} \text{ при } \omega t = \frac{\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{3}}{2} = \pi/3$$

Экстремальные значения функции (5.12) при $h = R = 1$:

$$S_{3 \max} = \sin \frac{\pi}{6} + \sin \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{3} \right) + \sin \left(\frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3} \right) = 2$$

$$S_{3 \min} = \sin \frac{\pi}{3} + \sin \left(\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{3} \right) + \sin \left(\frac{\pi}{3} + \frac{2\pi}{3} \right) = \sqrt{3}.$$

4. Ветродвигатель с четырьмя парами лопастей: $n = 4$; $\alpha = \pi/4$.

Для этого случая будем иметь:

$$S_4 = hR [|\sin \omega t| + |\sin(\omega t + \alpha)| + |\sin(\omega t + 2\alpha)| + |\sin(\omega t + 3\alpha)|] \quad (5.13)$$

Аналогично предыдущему рассуждению $\omega t \leq \frac{\pi}{4}$ и

$$a(\alpha) = \sin \alpha + \sin 2\alpha + \sin 3\alpha = \sin \frac{\pi}{4} + \sin \frac{\pi}{2} + \sin \frac{3\pi}{4} \cong 2,414$$

$$b(\alpha) = 1 + \cos \alpha + \cos 2\alpha + \cos 3\alpha = 1 + \cos \frac{\pi}{4} + \cos \frac{\pi}{2} + \cos \frac{3\pi}{4} = 1$$

$$\varphi(\alpha) = \arctg \frac{a(\alpha)}{b(\alpha)} = \arctg 2,414 = 1,128 \text{ рад; } (67,5^\circ)$$

$$c(\alpha) = \sqrt{26414^2 + 1} = 2,613$$

$$S_4 = S_{4 \max} \text{ при } \omega t = \frac{\pi}{8}; (22,5^\circ)$$

Экстремальные значения функции (5.13) при $h = R = 1$:

$$S_{4 \max} = \sin \frac{\pi}{2} + \sin \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) + \sin \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\pi}{2} \right) + \sin \left(\frac{\pi}{8} + \frac{3\pi}{4} \right) = 2,613$$

$$S_{4 \min} = \sin \frac{\pi}{4} + \sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4} \right) + \sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2} \right) + \sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\pi}{4} \right) = 2,414$$

5. Ветродвигатель с пятью парами лопастей: $n = 5$; $\alpha = \frac{\pi}{5}$.

$$S_5 = hR [|\sin \omega t| + |\sin(\omega t + \alpha)| + |\sin(\omega t + 2\alpha)| + |\sin(\omega t + 3\alpha)| + |\sin \omega t + 4\alpha|] \quad (5.14)$$

Ограничение: $\omega t \leq \frac{\pi}{5}$

$$a(\alpha) = \sin\alpha + \sin 2\alpha + \sin 3\alpha + \sin 4\alpha \cong 3,078$$

$$b(\alpha) = 1 + \cos\alpha + \cos 2\alpha + \cos 3\alpha + \cos 4\alpha = 1$$

$$\varphi(\alpha) = \arctg \frac{a(\alpha)}{b(\alpha)} = \arctg 3,078 = 1,257 \text{ рад.; } (78,02^\circ)$$

$$T_5 = \frac{\pi}{5}; c(\alpha) = \sqrt{3,078^2 + 1} = 3,236$$

$$S_5 = S_{5 \min}; \text{ при } \omega t = \frac{\pi}{5}; (36^\circ).$$

Экстремальные значения функции (5.14) при $h = R = 1$:

$$S_{5 \max} = \sin \frac{\pi}{10} + \sin \left(\frac{\pi}{10} + \frac{2\pi}{5} \right) + \sin \left(\frac{\pi}{10} + \frac{3\pi}{5} \right) + \sin \left(\frac{\pi}{10} + \frac{4\pi}{5} \right) = 3,078$$

6. Ветроходвигатель с шестью парами лопастей: $n = 6$; $\alpha = \frac{\pi}{6}$.

$$S_6 = hR[|\sin \omega t| + |\sin(\omega t + \alpha)| + |\sin(\omega t + 2\alpha)| + |\sin(\omega t + 3\alpha)| + |\sin(\omega t + 4\alpha)| + |\sin(\omega t + 5\alpha)|] \quad (5.15)$$

Ограничение: $\omega t \leq \frac{\pi}{6}$

$$a(\alpha) = \sin\alpha + \sin 2\alpha + \sin 3\alpha + \sin 4\alpha + \sin 5\alpha = 3,732$$

$$b(\alpha) = 1 + \cos\alpha + \cos 2\alpha + \cos 3\alpha + \cos 4\alpha + \cos 5\alpha = 1$$

$$\varphi(\alpha) = \arctg \frac{a(\alpha)}{b(\alpha)} = \arctg 3,732 = 1,309 \text{ рад.; } (75^\circ).$$

$$T_6 = \frac{\pi}{6}; c(\alpha) = \sqrt{3,732^2 + 1} \cong 3,864$$

$$S_6 = S_{6 \min} \text{ при } \omega t = \frac{\pi}{6}.$$

Экстремальные значения функции (5.15) при $h = R = 1$:

$$S_{6 \max} = \sin \frac{\pi}{12} + \sin \left(\frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{6} \right) + \sin \left(\frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{3} \right) + \sin \left(\frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{2} \right) + \sin \left(\frac{\pi}{12} + \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(\frac{\pi}{12} + \frac{5\pi}{6} \right) = 3,864$$

$$S_{6 \min} = \sin \frac{\pi}{6} + \sin \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{6} \right) + \sin \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{3} \right) + \sin \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{2} \right) + \sin \left(\frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(\frac{\pi}{6} + \frac{5\pi}{6} \right) = 3,732$$

Вышеприведенные вычисления показали, что соотношение между S_{\max} и S_{\min} для ветроходвигателя с различными n не остается постоянным. Очевидно, что для равномерной работы ветроходвигателя величина относительной разно-

сти S_{max} и S_{min} должна быть минимальной. Эта величина характеризуется коэффициентом пульсации и может быть вычислена по формуле:

$$K = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{max}} \quad (5.16)$$

Для исследуемых ветродвигателей $K_1 = 1$; $K_2 = 0,293$; $K_3 = 0,134$; $K_4 = 0,077$; $K_5 = 0,049$; $K_6 = 0,034$.

Оценка периодически меняющейся активной поверхности лопастей может быть проведена по ее среднему значению. Среднее значение S_{cp} для ветродвигателей с различными n определяем в соответствии с выражением:

$$S_{cp} = \frac{\pi R}{T} \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} S(\omega t) d\omega t, \quad (5.17)$$

где ωt_1 и ωt_2 – значения аргументов функции ωt на краях интервала T .

$$\text{Итак, } S_{cp1} = \frac{hR}{\pi} \int_0^{\pi} \sin \omega t d\omega t \cong 0,64 \cdot hR$$

$$S_{cp2} = \frac{2hR}{\pi} \int_0^{\pi/2} [\sin \omega t + \sin(\omega t + \alpha)] d\omega t \cong 1,24 \cdot hR$$

$$S_{cp3} = \frac{3hR}{\pi} \int_0^{\pi/3} [\sin \omega t + \sin(\omega t + \alpha)] + \sin(\omega t + 2\alpha) d\omega t \cong 1,91 \cdot hR$$

$$S_{cp4} = \frac{4hR}{\pi} \int_0^{\pi/4} [\sin \omega t + \sin(\omega t + \alpha)] + \sin(\omega t + 2\alpha) + \sin(\omega t + 3\alpha) d\omega t \cong 2,54 \cdot hR$$

$$S_{cp5} = \frac{5hR}{\pi} \int_0^{\pi/5} [\sin \omega t + \sin(\omega t + \alpha)] + \sin(\omega t + 2\alpha) + \sin(\omega t + 3\alpha) + \sin \omega t + 4\alpha d\omega t \cong 3,18 \cdot hR$$

$$S_{cp6} = \frac{6hR}{\pi} \int_0^{\pi/6} [\sin \omega t + \sin(\omega t + \alpha)] + \sin(\omega t + 2\alpha) + \sin(\omega t + 3\alpha) + \sin \omega t + 4\alpha + \sin \omega t + 5\alpha d\omega t \cong 3,82 \cdot hR$$

По величине активной поверхности лопастей рассчитаны приближенное значение развиваемой мощности:

$$P = 6,13 \cdot 10^{-4} V^3 \xi S, \text{ кВт}, \quad (5.18)$$

где V – скорость ветра, м/с (для Москвы $V = 3,2$ м/с) [85];

ξ – коэффициент использования энергии ветра (для тихоходных ветродвигателей $\xi = 0,1 \dots 0,3$). [361]

Для исследуемых ветродвигателей при $h = R = 1$ и $\eta = 0,15$:

$$P_1 = 1,92 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}; \quad P_2 = 3,73 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}; \quad P_3 = 5,75 \cdot 10^{-3} \text{ кВт};$$

$$P_4 = 7,65 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}; \quad P_5 = 9,58 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}; \quad P_6 = 11,51 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}.$$

Основные характеристики ветродвигателей с периодически меняющейся поверхностью лопастей сведены в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Параметры ветродвигателя с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей

Кол-во пар лопастей (n)	Активная поверхность лопастей, м^2 при $h = R = 1$		Период, (T)	Средняя активная поверхность ($S_{\text{ср}}$), м^2	Коэфф-т пульсации (k)	Развиваемая мощность, (P), $\text{кВт} \cdot 10^{-3}$ при скорости ветра 3,2 м/с
	S_{\min}	S_{\max}				
1	0	1	π	0,64	1	1,92
2	1	$\sqrt{2}$	$\pi/2$	1,24	0,293	3,73
3	$\sqrt{3}$	2,00	$\pi/3$	1,91	0,134	5,75
4	2,41	2,01	$\pi/4$	2,54	0,076	7,65
5	3,08	3,84	$\pi/5$	3,16	0,049	9,58
6	3,73	3,86	$\pi/6$	3,68	0,034	11,51

Поскольку парные лопасти размещены со смещением (углом α) между собой, с увеличением количества этих пар практически исключается неработоспособность ветродвигателей при неудачном расположении лопастей в начале воздействия ветрового потока.

Равенство $h = R = 1$ характеризует частный (и весьма редкий!) случай в соотношении геометрических размеров лопастей. Очевидно, что реальные ветродвигатели обладают значительно большими h и R и характеризоваться различными соотношениями между ними. Вместе с тем, используя предложенную методику, а также выражения (5.2), (5.16), (5.17) и (5.18), несложно определить характеристики других подобных ветродвигателей.

Выводы:

1. Эффективность работы силовых ветродвигателей может быть оценена по величине активной поверхности лопастей, которая рассчитывается в соответствии с предложенной методикой.
2. Для обеспечения работоспособности ветродвигателей при низких скоростях ветра, а также для уменьшения пульсаций силовые

ветродвигатели целесообразно изготавливать с несколькими парами смещенных в пространстве лопастей.

5.2 Определение коэффициента использования энергии ветра силовыми ветродвигателями

Коэффициент использования энергии ветра (ξ) – является одним из основных показателей эффективности ветродвигателей. Для получения выражения по определению коэффициента использования энергии ветра и выявления условий, обеспечивающих его максимальное значение в работе [128] проанализировано распределение вращающих моментов, формирующихся на лопастях. В общем случае ξ представляет собой отношение мощности, развиваемой ветродвигателем, к мощности ветрового потока, приходящегося на поверхность, ометаемую лопастями. Сложность определения ξ силовых ветродвигателей обусловлена вращательным движением лопастей (см. рисунок 5.4), из-за которого сила воздействия ветра и вращающий момент являются переменными. Помимо этого при определении вращающего момента необходимо учитывать, что в каждой элементарной точке, расположенной на лопасти и характеризующейся индивидуальным удалением от оси, плечо приложения силы будет различным. Поэтому общий вращающий момент следует определять как сумму элементарных моментов.

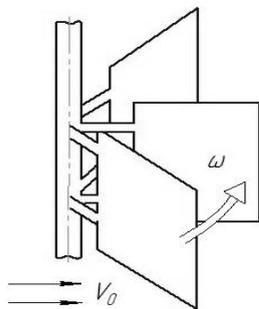


Рисунок 5.4 – Взаимодействие потока ветра с лопастями ветродвигателя

Для иллюстрации последующих рассуждений лопасть ветродвигателя в представлена в пространственных координатах $OXYZ$ (см.рисунок 31 приложения В) [127]. При этом ось OZ была совмещена с вертикальной осью вращения, а положительное направление оси OY – с направлением воздушного потока. Расположение лопасти в плане (на плоскости YOX) представлено на рисунке 32 приложения В.

Для упрощения задачи сделано допущение о том, что при повороте рассматриваемой лопасти на угол π ни одна из других лопастей ветродвигателя не окажется в пределах этого угла. Разобьем рассматриваемую лопасть на элементарные полоски, используя прямые линии, параллельные оси OZ . Пусть одна из этих полосок имеет проекцию на ось OX в виде отрезка $(x; x + dx)$. Тогда, рассматривая треугольник OAB , можно записать:

$$\frac{x}{r} = \cos\alpha, \quad (5.19)$$

где r – расстояние от оси OZ до исследуемой полоски, м; α – угол поворота лопасти относительно положительного направления оси OX , рад.

Следовательно,

$$r = \frac{x}{\cos\alpha} \quad (5.20)$$

С учетом того, что угловая скорость движения лопасти равна ω , линейная скорость полоски составит величину $v = \omega r = \omega \frac{x}{\cos\alpha}$. Проекция вектора линейной скорости полоски на ось OY может быть определена из треугольника ACD :

$$v_y = v \cos\alpha = \omega \frac{x}{\cos\alpha} \cos\alpha = \omega x \quad (5.21)$$

Известно, что сила, с которой воздушный поток воздействует на перпендикулярную ему поверхность, вычисляется в соответствии с выражением [18]:

$$P = C_x F \frac{\rho}{2} (V_0 - V_y)^2, \quad (5.22)$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления; F – поверхность взаимодействия с воздухом, м²; ρ – плотность воздуха, кг/м³; V_0 – скорость ветра, м/с.

Принимая во внимание, что поверхность элементарной полоски составляет величину $dF = a(x + dx - x) = adx$, где a – длина полоски (ширина лопасти), выражение (4) было записано следующим образом:

$$dP = C_x \frac{\rho}{2} adx (V_0 - V_y)^2 \quad (5.23)$$

С учетом обозначения $k = C_x a \frac{\rho}{2}$ выражение (4.23) примет вид:

$$dP = k(V_0 - V_y)^2 dx, \text{ Н}$$

Тогда сила давления ветра на всю лопасть определится выражением:

$$P = \int_0^{R \cos \alpha} k (V_0 - V_y)^2 dx = k \int_0^{R \cos \alpha} (\omega x - V_0)^2 dx = k \frac{1}{\omega} \cdot \frac{(\omega x - V_0)^3}{3} \Big|_0^{R \cos \alpha} =$$

$$k \frac{1}{\omega} \cdot [(\omega R \cos \alpha - V_0)^3 + V_0^3] = \frac{k}{3\omega} \cdot [\omega^3 R^3 \cos^3 \alpha - 3\omega^2 R^2 V_0 \cos^2 \alpha +$$

$$+ 3\omega R^2 V_0^2 \cos \alpha + V_0^3] = k R \cos \alpha [3R^2 \omega^2 \cos^2 \alpha - 3R V_0 \omega \cos \alpha + 3V_0^2]$$

Общий вращающий момент был определен суммой элементарных моментов dM в пределах изменения x от 0 до $R \cos \alpha$:

$$M(\alpha) = \int_0^{R \cos \alpha} dM = \int_0^{R \cos \alpha} x dP = \int_0^{R \cos \alpha} k (\omega x - V_0)^2 dx \quad (5.24)$$

$$M(\alpha) = k \int_0^{R \cos \alpha} (\omega^2 x^3 - 2\omega V_0 x^2 + V_0^2 x) dx = k \left[\frac{\omega^2 x^4}{4} - \frac{2\omega V_0 x^3}{3} + \right.$$

$$\left. + \frac{V_0^2 x^2}{2} \right]_0^{R \cos \alpha} = k \omega^2 R^4 \cos^4 \alpha - 2\omega V_0 R^3 \cos^3 \alpha + V_0^2 R^2 \cos^2 \alpha =$$

$$\frac{k R^2 \cos^2 \alpha}{12} [3\omega^2 R^2 \cos^2 \alpha - 8\omega V_0 R \cos \alpha + 6V_0^2]$$

Для оценки величины работы, производимой воздушным потоком при повороте лопасти на угол π (от $-\frac{\pi}{2}$ до $\frac{\pi}{2}$), запишем:

$$A = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} M(\alpha) d\alpha \quad (5.25)$$

$$A = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{k R^2}{12} [3\omega^2 R^2 \cos^4 \alpha - 8\omega V_0 R \cos^3 \alpha + 6V_0^2 \cos^2 \alpha] d\alpha \quad (5.26)$$

В процессе интегрирования выражения (5.26) последовательно найдены первообразные следующих функций; $f_1'(\alpha) = A_1 \cos^2 \alpha$, $f_2' = A_2 \cos^3 \alpha$, $f_3' = A_3 \cos^4 \alpha$, где $A_1 = 6V_0^2$; $A_2 = 8\omega V_0 R$; $A_3 = 3\omega^2 R^2$.

$$f_1(\alpha) = \int A_1 \cos^2 \alpha d\alpha = A_1 \int \frac{1 + \cos 2\alpha}{2} d\alpha = A_1 \int \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\alpha \right) d\alpha = \\ = A_1 \left[\frac{1}{2} \alpha + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \right] + C$$

Примем обозначение: $2\alpha = z_1$.

$$\text{Тогда } d\alpha = \frac{1}{2} dz_1 \text{ и } \frac{1}{2} \int \cos^2 \alpha d\alpha = \frac{1}{2} \int \cos^2 z_1 \cdot \frac{1}{2} dz_1 = \frac{1}{4} \int \cos^2 z_1 dz_1 = \frac{1}{4} \sin z_1 + \\ + C = \frac{1}{4} \sin 2\alpha + C$$

$$\text{Следовательно, } f_1(\alpha) = A_1 \left[\frac{1}{2} \alpha + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \right] + C$$

$$f_2(\alpha) = \int A_2 \cos^3 \alpha d\alpha = A_2 \int \cos^2 \alpha \cos \alpha d\alpha$$

В качестве дифференциала новой переменной z_2 из подынтегрального выражения был выделен множитель $\cos \alpha d\alpha$. В результате получено:

$$\sin \alpha = z_2; \cos \alpha d\alpha = dz_2.$$

Выражение, остающееся под интегралом после выделения множителя $\cos \alpha d\alpha$, а именно $\cos^2 \alpha$, рационально выражается через z_2 :

$$\cos^2 \alpha = 1 - \sin^2 \alpha = 1 - z_2^2.$$

Объединив результаты, получим:

$$f_2(\alpha) = A_2 \int \cos^2 \alpha d\alpha = A_2 \int (1 - z_2^2) dz_2 = A_2 \left[z_2 - \frac{z_2^3}{3} \right] + C$$

$$f_3(\alpha) = \int A_3 \cos^4 \alpha d\alpha = A_3 \int \cos^2 \alpha \cos^2 \alpha d\alpha = A_3 \int (\cos^2 \alpha)^2 d\alpha \\ = A_3 \int \left(\frac{1 + \cos 2\alpha}{2} \right)^2 d\alpha \\ = A_3 \int \left(\frac{1 + \cos 2\alpha + \cos^2 2\alpha}{4} \right) d\alpha \\ = A_3 \frac{1}{4} \left[\alpha + \sin 2\alpha + \int \left(\frac{1 + \cos 4\alpha}{2} \right) d\alpha \right] + C \\ = A_3 \frac{1}{4} \left[\alpha + \sin 2\alpha + \frac{1}{2} \alpha + \frac{1}{8} \sin 4\alpha \right] + C \\ = A_3 \left[\frac{3}{8} \alpha + \frac{1}{4} \sin 2\alpha + \frac{1}{32} \sin 4\alpha \right] + C$$

В результате подстановки полученных значений в выражение (5.26) было получено:

$$A = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} M(\alpha) d\alpha = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{kR^2}{12} [A_3 \cos^4 \alpha - A_2 \cos^3 \alpha + A_1 \cos^2 \alpha] d\alpha =$$

$$kR^2 \left[\frac{1}{5} \cos^5 \alpha - \frac{3}{8} \cos^4 \alpha + \frac{3}{2} \cos^3 \alpha - \frac{3}{2} \cos^2 \alpha + \frac{3}{2} \cos \alpha - \frac{3}{2} \right]_{-\pi/2}^{\pi/2}$$

$$\text{или } A = kR^2 \left[\frac{3}{32} \omega^2 R^2 \pi - \frac{8}{9} \omega V_0 R + \frac{1}{4} \pi \right]$$

Мощность, развиваемая ветродвигателем, определена произведением [293]:

$$N = M_{\text{ср}} \omega, \text{ Вт} \quad (5.27)$$

где $M_{\text{ср}}$ – средний вращающий момент на интервале от $-\frac{\pi}{2}$ до $\frac{\pi}{2}$.

$$M_{\text{ср}} = \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} M(\alpha) d\alpha}{\pi} \quad (5.28)$$

Интегрированием вращающего момента в пределах от $-\frac{\pi}{2}$ до $\frac{\pi}{2}$, была определена работа [358]:

$$N = \frac{kR^2 \omega \left[\frac{3}{32} \omega R^2 \pi - \frac{8}{9} \omega V_0 R + \frac{1}{4} V_0^2 \pi \right]}{\pi}$$

Поток с поперечным сечением F обладает кинетической энергией:

$$E_c = \frac{mV_0^2}{2}, \text{ Вт} \quad (5.29)$$

где m – масса воздуха, протекающего через сечение F за одну секунду.

С другой стороны, «секундную» массу можно представить так:

$$m = \rho F V_0 \quad (5.30)$$

Подстановкой «секундной» массы из выражения (4530) в формулу (5.29), получено:

$$E_c = N_1 = \frac{\rho F V_0^3}{2} \quad (5.31)$$

В работе [127] определены значения коэффициентов использования энергии ветра для случаев равенства поперечного сечения простому произведению $F = a \cdot R$ и с учетом изменения сечения по мере поворота лопасти $F = a \cdot R \cdot \cos \alpha$.

При первом подходе будем иметь: $N_1 = \frac{\rho a R V_0^3}{2}$, Вт.

$$\xi_1 = \frac{N}{N_1} = \frac{2kR^2\omega \left[\frac{3}{32}\omega^2 R^2 \pi - \frac{8}{9}\omega V_0 R + \frac{1}{4}V_0^3 \pi \right]}{\pi \rho a R V_0^3} \quad (5.32)$$

$$\text{или } \xi_1 = \frac{C_x R \left[\frac{3}{32}\omega^3 R^2 \pi - \frac{8}{9}\omega^2 V_0 R + \frac{1}{4}\omega V_0^3 \pi \right]}{V_0^3 \pi} \quad (5.33)$$

В результате деления получим:

$$\xi_1 = \frac{C_x}{\pi} \left[\frac{3}{32} R^3 \pi \left(\frac{\omega}{V_0} \right)^3 - \frac{8}{9} R^2 \left(\frac{\omega}{V_0} \right)^2 + \frac{1}{4} R \pi \left(\frac{\omega}{V_0} \right) \right] \quad (5.34)$$

Для решения по второму подходу найдено среднее значение поперечного сечения на интервале от $-\frac{\pi}{2}$ до $\frac{\pi}{2}$:

$$F_{\text{ср}} = \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} F(\alpha) d\alpha}{\pi} = \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} a R \cos \alpha d\alpha}{\pi} = \frac{aR}{\pi} \sin \alpha \Big|_{-\pi/2}^{\pi/2} = \frac{aR}{\pi} [1 - (-1)] = \frac{1aR}{\pi}$$

После подстановки полученного результата в выражение (5.31), получено:

$$N_2 = \frac{\rho a R V_0^3}{\pi}.$$

$$\text{Аналогично } \xi_2 = \frac{N}{N_2} = \frac{C_x R \left[\frac{3}{12}\omega^3 R^2 \pi - \frac{8}{9}\omega^2 V_0 R + \frac{1}{4}\omega V_0^2 \pi \right]}{2V_0^3} \quad (5.35)$$

Или

$$\xi_2 = \frac{C_x}{2} \left[\frac{3}{32} R^3 \pi \left(\frac{\omega}{V_0} \right)^3 - \frac{8}{9} R^2 \left(\frac{\omega}{V_0} \right)^2 + \frac{1}{4} R \pi \left(\frac{\omega}{V_0} \right) \right] \quad (5.36)$$

По выражениям (5.33), (5.34) и (5.35), (5.36) сделан вывод, что ξ зависит от длины лопасти и соотношения скоростей. При некоторых значениях R , ω и V_0 коэффициент использования энергии ветра максимален. Для определения этих значений введена новая переменная $z = \frac{\omega}{V_0} R$ (число модулей).

Таким образом,

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \frac{C_x}{\pi} \left[\left(\frac{3}{2} \pi \right) z^3 - \left(\frac{8}{9} \right) z^2 + \left(\frac{1}{4} \pi \right) z \right] \\ \frac{d\xi_1}{dz} &= \frac{C_x}{\pi} \left[\left(\frac{9}{32} \pi \right) z^2 - \left(\frac{16}{9} \right) z + \left(\frac{1}{4} \pi \right) \right] \\ \left(\frac{9}{32} \pi \right) z^2 - \left(\frac{16}{9} \right) z + \left(\frac{1}{4} \pi \right) &= 0 \end{aligned} \quad (5.37)$$

При решении квадратного уравнения (4.37) получено::

$$Z_{1;2} = \frac{\frac{16}{9} \pm \sqrt{\frac{256}{81} - \frac{9}{32}\pi}}{\frac{18}{32}\pi}.$$

Откуда $z_1 = 1,357$ $z_2 = 0,655$

В результате подстановки полученных корней в выражения (5.34) и (5.36) определяем, что ξ_1 и ξ_2 достигают своих максимальных значений ($\xi_1 = 6,87 \cdot 10^{-2}$ и $\xi_2 = 10,793 \cdot 10^{-2}$) при $z = 0,655$. Значения коэффициентов использования энергии ветра ξ_1 и ξ_2 , рассчитанные для $C_x = 1$ при $0 \leq z \leq 1$ представлены в таблице.5.2.

Таблица 5.2 – Значения коэффициентов использования энергии ветра ξ_1 и ξ_2 при разных числах модулей z

z	$\xi_1 \cdot 10^{-2}$	$\xi_2 \cdot 10^{-2}$	z	$\xi_1 \cdot 10^{-2}$	$\xi_2 \cdot 10^{-2}$
0	0	0	0,55	6,751	10,604
0,05	1,180	1,854	0,60	6,839	10,743
0,10	2,226	3,500	0,65	6,870	10,791
0,15	3,145	4,940	0,70	6,851	10,762
0,20	3,943	6,134	0,75	6,789	10,664
0,25	4,628	7,300	0,80	6,691	10,510
0,30	5,207	8,179	0,85	6,564	10,311
0,35	5,686	8,932	0,90	6,416	10,078
0,40	6,073	9,534	0,95	6,252	9,821
0,45	6,375	10,014	1,00	6,081	9,552
0,50	6,598	10,364			

Коэффициент лобового сопротивления C_x для поверхностей, имеющих удлинение $\lambda = 10$, соответствует 1,3. Следовательно,

$$\xi_{1m} = 871 \cdot 10^{-2} \times 1,3 = 0,089 \quad (8,9\%)$$

$$\xi_{2m} = 10,78 \cdot 10^{-2} \times 1,3 = 0,140 \quad (14,9\%)$$

На рисунке 5.7 представлены графики функции $\xi_1 = f_1(z)$ и $\xi_2 = f_2(z)$, построенные при $C_x = 1$ с шагом аргумента 0,01.

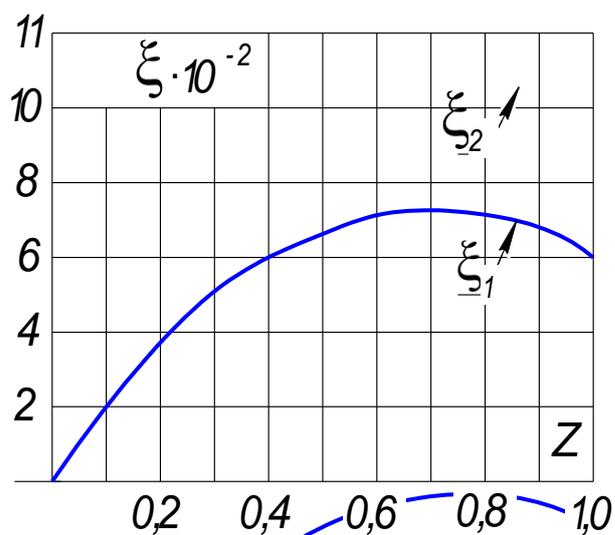


Рисунок 5.7 – Зависимости коэффициентов использования энергии ветра от числа модулей.

Вследствие употребления понятия угловой скорости, полученные результаты для практического использования не вполне удобны. Поэтому запишем заключительные соотношения с применением символа n (частоты вращения, измеряемой в оборотах в минуту):

$$Z_{\text{опт}} = 0,655 = \frac{\omega}{V_0} R = \frac{\pi n R}{30 V_0}.$$

В соотношении $0,655 = \frac{\pi n R}{30 V_0}$ поделим правую и левую части на π и умножим их на 30: $6,255 = \frac{n}{V_0} R$. Откуда $n_{\text{опт}} = \frac{6,255 V_0}{R}$ [76].

Для оперативного определения оптимального режима работы ветродвигателя построена номограмма, приведенная на рисунке 28 приложения Б.

Итак, коэффициент использования энергии ветра силовых ветродвигателей зависит от соотношения частоты вращения, линейной скорости воздушного потока, а также от длины лопастей. Наивысшая эффективность использования энергии ветра ($\xi_1 = 6,871 \cdot 10^{-2}$ и $\xi_2 = 10,793 \cdot 10^{-2}$) достигается при выполнении условия $\frac{n}{V_0} R = 6,255$.

5.3 Повышение эффективности силовых ветродвигателей с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей

Целью настоящего этапа исследований является анализ наиболее распространенных конструкций ветродвигателей с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей и поиск технических решений по повышению их эффективности. В качестве классического примера реализации принципа периодического изменения активной поверхности лопастей использован ветродвигатель, запатентованный в Великобритании по заявке [246]. Этот ветродвигатель включает два взаимно-перпендикулярных вала (вертикальный вал 1 и горизонтальный вал 2) и две лопасти (3 и 4). Взаимно-перпендикулярные валы установлены на противоположных концах горизонтального вала 2 под углом друг к другу. При этом горизонтальный вал 2 укреплен на вертикальном валу 1 с возможностью вращения относительно своей продольной оси MN (см. рисунок 33 а приложения В). Вертикальный вал 1 также обладает своей продольной осью KL, остающуюся в неизменном положении при работе ветродвигателя. Пересечение осей MN и KL приходится на точку O. Отрезок OL будем считать верхней частью оси KL, а отрезок KO – нижней.

Не менее распространен ветродвигатель, разработанный инженерами Польши [247], Этот ветродвигатель содержит вертикальный вал 5 и два горизонтальных вала 6 и 7, установленные на одной линии. Линия установки горизонтальных валов перпендикулярна вертикальному валу 5 с противоположных его сторон. На горизонтальных валах расположены две свободно качающиеся лопасти 8 и 9 и два упорных элемента 10 и 11. Эти упорные элементы жестко прикреплены к вертикальному валу 5 с противоположных сторон лопастей и вблизи их нижнего края (см. рисунок 33 приложения В). Горизонтальные валы 6 и 7 могут вращаться относительно своих продольных осей MO и ON.

В результате длительной эксплуатации обеих разработок был выявлен их основной недостаток, заключающийся в низкой эффективности использования энергии ветра вследствие образования на лопастях ветродвигателей вращающих моментов противоположных направлений. Для устранения недостатка

был разработан, испытан и запатентован новый ветродвигатель [313], общий вид которого представлен на рисунке 34 приложения В. В этом ветродвигателе были объединены два признака, характеризующие разработки по заявкам [246, 247], – сплошной горизонтальный вал и упорные элементы.

Разработанная конструкция содержит вертикальный вал 12 и сплошной горизонтальный вал 13, установленный перпендикулярно вертикальному валу 12. Горизонтальный вал 13 обладает возможностью поворота относительно своей продольной оси MN. На противоположных концах сплошного горизонтального вала 13, под прямым углом друг к другу установлены две лопасти 14 и 15. К вертикальному валу 1, с противоположных сторон лопастей 14 и 15, вблизи их нижнего края жестко прикреплены два упорных элемента 16 и 17.

В работах [159, 181] проанализированы движения лопастей сравниваемых ветродвигателей и рассмотрены проекции S_{14} и S_{15} поверхностей лопастей 14 и 15 на плоскость, перпендикулярную направлению ветра [299]:

$$S_{14} = a|\cos\beta_{14}|b \cos\alpha_{14} \quad (5.38)$$

$$S_{15} = a|\cos\beta_{15}|b \cos\alpha_{15} \quad (5.39)$$

Вследствие различия углов β_{14} и β_{15} на 180° можно записать:

$$|\cos\beta_{14}| = |\cos\beta_{15}|.$$

Обозначим: $|\cos\beta_{14}| = |\cos\beta_{15}| = |\cos\beta|$

В случае, когда лопасть 14 находится в рабочем состоянии $\alpha_{14}=0$.

Следовательно, $\cos\alpha_{14}=1$. В это же время $\cos\alpha_{15}=0$ и $\alpha_{15}=90^\circ$.

После поворота вертикального вала 12 вокруг своей продольной оси на 180° (когда в рабочем состоянии окажется лопасть 15), $\alpha_{14}=90^\circ$, $\cos\alpha_{14}=0$, а $\alpha_{15}=0$ и $\cos\alpha_{15}=1$.

Таким образом, в выражениях (5.38) и (5.39) происходит чередование равенства нулю и единицы одного из сомножителей. Следовательно, разность проекций S_p поверхностей лопастей 3 и 4 на плоскость, перпендикулярную направлению ветра, можно представить выражением: $S_p = ab|\cos\beta|(1 - 0) = ab|\cos\beta|$

$$(5.40)$$

Таким образом, результирующий вращающий момент усовершенствованного ветродвигателя, оказывается пропорциональным произведению поверхности лопасти (ab) на сомножитель $|\cos \beta|$. Для оценки выражения (4.40), полученного для усовершенствованного ветродвигателя, проведены рассуждения для разработок по заявкам [246, 247]

№ 265323. Для ветродвигателя по [246] проекции поверхностей лопастей 3 и 4 на плоскость, перпендикулярную направлению ветра представлены выражениями:

$$S_3 = a|\cos \beta_3 b \cos \alpha_3| \quad (5.41)$$

$$S_4 = a|\cos \beta_4 b \cos \alpha_4| \quad (5.42)$$

где β_3 и β_4 – углы между прямой линией, проведенной через точку пересечения продольной оси вертикального вала 1 и горизонтального вала 2 на плоскости, перпендикулярной направлению ветра и лопастями 3 и 4 соответственно. Очевидно, что $|\cos \beta_3| = |\cos \beta_4|$, поскольку аргументы β_3 и β_4 различаются друг от друга на величину 180° . Обозначим $|\cos \beta_3| = |\cos \beta_4| = |\cos \beta_a|$

$$\text{Тогда } S_3 = a |\cos \beta_a b \cos \alpha_3| \quad (5.43)$$

$$S_4 = a |\cos \beta_a b \cos \alpha_4| \quad (5.44)$$

По сравнению с поверхностями лопастей 3 и 4 (которые могут быть определены произведением ab) проекции их поверхностей на плоскость, перпендикулярную направлению ветра, всегда будут достаточно малы. Такой вывод можно сделать, анализируя выражения (5.43) и (5.44), в которых S_3 и S_4 определяются произведением поверхности ab на произведение двух тригонометрических функций, каждая из которых не превышает единицу.

Поскольку результирующий вращающий момент ветродвигателя по заявке [246] соответствует геометрической сумме противоположно направленных вращающих моментов и пропорционален разности проекций S_3 и S_4 можно записать:

$$S_{pa} = ab |\cos \beta_a \times |\cos \alpha_3 - \cos \alpha_4|| \quad (5.45)$$

Очевидно, что получаемая при этом величина окажется еще меньше значений S_3 или S_4 .

Сравнивая между собой выражения (5.40) и (5.45), делаем вывод, что s_p всегда больше s_{pa} , что свидетельствует о большей эффективности использования энергии ветра в усовершенствованном ветродвигателе, чем в ветродвигателе по заявке [246]

При сравнении усовершенствованного варианта с разработкой по заявке [247], определена величина разности проекций поверхностей лопастей 8 и 9 на плоскость, перпендикулярную направлению ветра. Проекции поверхностей лопастей 8 и 9 на плоскость, перпендикулярную направлению ветра, определены выражениями:

$$S_8 = a |\cos \beta_8 b \cos \alpha_8| \quad (5.46)$$

$$S_9 = a |\cos \beta_9 b \cos \alpha_9| \quad (5.47)$$

где β_8 и β_9 – углы между прямой линией, проведенной через точку пересечения продольных осей МО и ОН горизонтальных валов 6 и 7 с продольной осью КЛ вертикального вала 5

Нетрудно заметить, что, $|\cos \beta_8| = |\cos \beta_9|$. Обозначив $|\cos \beta_8| = |\cos \beta_9| = |\cos \beta_n|$, запишем:

$$S_8 = a |\cos \beta_n| b \cos \alpha_8 \quad (5.48)$$

$$S_9 = a |\cos \beta_n| b \cos \alpha_9 \quad (5.49)$$

В случае, когда лопасть 8 находится в рабочем состоянии, угол α_8 равен нулю. При этом $\cos \beta_8 = 1$. После поворота вертикального вала 5 вокруг своей продольной оси КЛ на 180° $\alpha_9 = 0$ и $\cos \alpha_9 = 1$. Таким образом, в выражениях (5.48) и (5.49) чередуется равенство единице одного из сомножителей. Принимая это во внимание, разность проекций поверхностей лопастей 8 и 9 на плоскость, перпендикулярную направлению ветра, можно представить в виде:

$$S_{pn} = ab |\cos \beta_n| (1 - \cos \alpha_n), \quad (5.50)$$

где α_n – угол между лопастью, находящейся в нерабочем состоянии, и

продольной осью KL нижней части вертикального вала 5.

Итак, результирующий вращающий момент ветродвигателя по заявке [247], являясь пропорциональным разности S_{pn} проекций поверхностей лопастей 8 и 9 на плоскость, перпендикулярную направлению ветра, пропорционален произведению поверхности лопасти (ab) на сомножители $\cos \beta_n$ и $(1 - \cos \alpha_n)$. Поскольку каждый из последних двух сомножителей меньше единицы, их произведение является еще меньшей величиной.

Таким образом, эффективность использования энергии ветра в ветродвигателе по заявке [247] хотя и несколько выше, чем в ветродвигателе по заявке [246] (см. выражение (5.45)), однако остается довольно низкой вследствие влияния тормозящего вращающего момента, образуемого давлением ветра на лопасть, находящуюся в нерабочем состоянии. При сравнении между собой выражений (5.40), (5.45) и (5.50). становится очевидным, что несмотря на различия конструкций рассмотренных ветродвигателей, входящие в эти выражения аргументы β , β_a и β_n представляют собой одни и те же углы. То есть $\beta = \beta_a = \beta_n$. Разделив выражение (5.40) на выражения (5.45) и (5.50), получим:

$$\frac{S_p}{S_{pa}} = \frac{1}{|\cos \alpha_3 - \cos \alpha_4|}, \quad (5.51)$$

$$\frac{S_p}{S_{pn}} = \frac{1}{1 - \cos \alpha_n} \quad (5.52)$$

Принимая во внимание область изменения функций $\cos \alpha_3$, $\cos \alpha_4$ и $\cos \alpha_n$, запишем:

$$S_p > S_{pn} > S_{pa}$$

Вышеизложенные рассуждения позволяют сделать вывод о том, что эффективность использования энергии ветра в усовершенствованном ветродвигателе в $\left(\frac{1}{1 - \cos \alpha_n}\right)$ раз выше, чем в ветродвигателе по заявке [247] (см. выражение (5.51)) и в $\left(\frac{1}{\cos \alpha_3 - \cos \alpha_4}\right)$ раз выше, чем в ветродвигателе по заявке [246] (см. выражение (5.52)).

Подставляя численные значения аргументов в диапазонах $0 \leq \alpha_3 \leq 45^\circ$,

$45^\circ \leq \alpha_4 \leq 90^\circ$ и вычисляя среднее значение функции (5.51), а также, принимая $\alpha_n = 75^\circ$ и вычисляя функцию (5.52), устанавливаем, что эффективность использования энергии ветра в разработанном ветродвигателе в 2,16 раза выше, чем в ветродвигателе по заявке [246] и в 1,35 раз выше, чем в ветродвигателе по заявке [247].

Вывод: Усовершенствованная конструкция ветродвигателя с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей является более эффективной по сравнению с ранее известными разработками. Повышенная эффективность в первую очередь, проявляется при слабом ветре, обеспечивая работоспособность ветродвигателя при скорости 1,5...2,0 м/с. В то же время новый ветродвигатель остается простым в изготовлении и не требует применения дорогостоящих материалов.

5.4 Уравновешивание силовых ветродвигателей со взаимно-перпендикулярными валами

Важным условием ресурсосберегающего режима работы силовых ветродвигателей является уравновешивание движущихся элементов конструкции. Кроме того, уравновешивание предотвращает образования вибраций и способствует повышению срока эксплуатации ветроэнергетических установок.

При работе силовых ветродвигателей с меняющейся активной поверхностью лопастей часть кинетической энергии ветра расходуется на их переориентацию лопастей и не участвует в формировании рабочего вращающего момента. Для определения условий минимизации этой энергии в работе [248, 269]. рассмотрена совокупность сил, действующих в плоскости, перпендикулярной горизонтальной оси. Пренебрегая возможной пространственной неравномерностью скорости ветра, сделаем допущение о равенстве кинетической энергии, приходящейся на обе лопасти.. Помимо этого будем считать, что вертикальный вал остается неподвижным, трение в подшипниках горизонтального вала отсутствует, направление ветра строго параллельно поверхно-

сти Земли, масса лопастей распределена равномерно по их объему, лопасти ветродвигателя одинаковы и имеют форму прямоугольников. (см.рисунок 5.8).

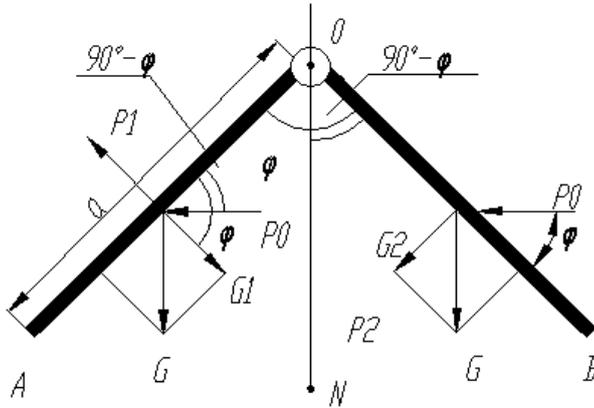


Рисунок 5.8 – Силы, действующие на лопасти, в плоскости, перпендикулярной горизонтальной оси.

Через точку пересечения лопастей (через горизонтальную ось) проведем отрезок прямой ON , перпендикулярный поверхности Земли. Пусть лопасть A образует с этим отрезком угол φ , а лопасть B – угол $90^\circ - \varphi$. На лопасти ветродвигателя действуют следующие силы: G – сила тяжести ($G = mg$, где m – масса лопасти, g – ускорение свободного падения); G_1 и G_2 – составляющие силы тяжести, направленные перпендикулярно поверхностям лопастей ($G_1 = G \cdot \sin\varphi$, $G_2 = G \cdot \cos\varphi$); P_1 и P_2 – силы, с которыми ветер действует на лопасти A и B соответственно ($P_1 = P_0 \cdot \cos\varphi$; $P_2 = P_0 \cdot \sin\varphi$, где P_0 – сила, с которой ветер воздействует на лопасть при ее расположении перпендикулярно воздушному потоку) [313].

Рассмотрим вращающие моменты, которые образуют перечисленные силы по отношению к точке O : $M_1 = G_1 \frac{a}{2} = G \frac{a}{2} \sin\varphi$, $M_2 = G_2 \frac{a}{2} = G \frac{a}{2} \cos\varphi$, где a – длина лопасти.

$$M_3 = P_1 \frac{a}{2} \cos\varphi = P_0 \frac{a}{2} \cos\varphi \cdot \cos\varphi = P_0 \frac{a}{2} \cos^2\varphi$$

$$M_4 = P_2 \frac{a}{2} \sin\varphi = P_0 \frac{a}{2} \sin\varphi \cdot \sin\varphi = P_0 \frac{a}{2} \sin^2\varphi$$

Выразим суммарный вращающий момент следующим образом:

$$M_{\text{вр}} = G \frac{a}{2} \sin\varphi - G \frac{a}{2} \cos\varphi - P_0 \frac{a}{2} \cos^2\varphi - P_0 \frac{a}{2} \sin^2\varphi$$

$$\text{или } M_{\text{вр}} = G \frac{a}{2} (\sin\varphi - \cos\varphi) - P_0 \frac{a}{2}$$

При неподвижных или равномерно движущихся лопастях [359]

$$G \frac{a}{2} (\sin\varphi - \cos\varphi) - P_0 \frac{a}{2} = 0 \quad (5.53)$$

Из выражения (4.53) получим:

$$P_0 = G(\sin\varphi - \cos\varphi) \quad (5.54)$$

График функции (5.54) для $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$ представлен на рисунке 29 приложения Б (кривая 1). Из графика видно, что минимальное усилие для поворота лопастей требуется при $\varphi = 45^\circ$. В этой точке лопасти уравновешены, однако при отклонении от нее даже на малый угол равновесие нарушается. При $\varphi < 45^\circ$ усилия ветра для поворота лопастей не требуется. Здесь величина P_0 отрицательна, и лопасти поворачиваются под действием силы тяжести. Наконец, для поворота лопастей при $\varphi > 45^\circ$ необходимо определенное усилие P_0 . Причем, с увеличением φ требуемое значение P_0 возрастает.

Очевидно, что для увеличения «подвижности» лопастей следует стремиться к уменьшению усилия P_0 в области $\varphi > 45^\circ$. При этом нельзя допускать, чтобы в области $0 \leq \varphi < 45^\circ$ величина P_0 становилась положительной.

Для решения этой задачи дополним рассматриваемую конструкцию противовесом [321]. Противовес представляет собой компактный груз (соизмеримый с массой лопастей), находящийся на достаточно тонком штоке в некотором удалении от точки O . Для соблюдения симметрии расположим шток относительно лопастей A и B под углом 135° (см. рисунок 30 приложения Б). Продлим отрезок ON вверх (на длину штока) и обозначим верхнюю точку получившегося отрезка символом L . К принятым ранее обозначениям добавим: γ – угол между штоком противовеса и отрезком OL ; G_3 – силу тяжести, образуемую противовесом ($G_3 = m_{\text{пр}}g$, где $m_{\text{пр}}$ – массу противовеса); G_4 – составляющую силы тяжести G_3 , направленную перпендикулярно штоку, $G_4 = G_3 \sin\varphi$, l – расстояние от точки O до центра противовеса.

Анализируя образовавшиеся углы, запишем:

$$\varphi = 45^\circ - (90^\circ - \varphi) = \varphi - 45^\circ$$

Тогда вращающий момент, обусловленный влиянием противовеса, сведется к виду [278]:

$$M_5 = G_4 l = G_3 l \sin \gamma = G_3 l \sin(\varphi - 45^\circ),$$

а суммарный вращающий момент

$$M_{\text{вр}} = G \frac{a}{2} (\sin \varphi - \cos \varphi) - P_0 \frac{a}{2} - G_3 l \sin(\varphi - 45^\circ).$$

При неподвижных или равномерно движущихся лопастях [280]

$$G \frac{a}{2} (\sin \varphi - \cos \varphi) - P_0 \frac{a}{2} - G_3 l \sin(\varphi - 45^\circ) = 0 \quad (5.55)$$

$$\text{Откуда } P_0 = G (\sin \varphi - \cos \varphi) - \frac{2G_3 l \sin(\varphi - 45^\circ)}{a} \quad (5.56)$$

В частном случае, когда $G_3 = G$ и $l = \frac{a}{2}$ или $G \frac{a}{2} = G_3 l$, выражение (5.56) представлено в виде:

$$P_0 = G (\sin \varphi - \cos \varphi) - G \sin(\varphi - 45^\circ) \quad (5.57)$$

График функции (5.57) при $G = 1$ изображен на рисунке 5.12.

Найдем сочетание параметров противовеса (G_3 и l), при которых наилучшим образом достигается статическое равновесие. Для этого вернемся к выражению (5.56), приравняем его к нулю и решим относительно $G_3 l$:

$$G (\sin \varphi - \cos \varphi) = \frac{2G_3 l \sin(\varphi - 45^\circ)}{a} \quad (5.58)$$

Пусть $\varphi = 0$. Тогда выражение (5.58) запишется в виде:

$$G(0 - 1) = \frac{2G_3 l}{a} \left[-\frac{\sqrt{2}}{2} \right] \text{ или } G = \frac{\sqrt{2} G_3 l}{a}$$

Откуда

$$G_3 l = \frac{aG}{\sqrt{2}}, \quad G_3 = \frac{aG}{l\sqrt{2}}, \quad l = \frac{aG}{G_3\sqrt{2}}$$

Таким образом, при соблюдении найденных условий статическое равновесие будет сохраняться при всех значениях φ . Вместе с тем практическое использование единственного противовеса нежелательно. Это объясняется тем, что балансировка лопастей одним противовесом сопряжена с чисто техническими сложностями: при незначительном изменении параметров противовеса

конструкция из уравновешенной превращается неуравновешенную. Кроме того, процедура уравновешивания существенно усложняется, если лопасти ветродвигателя неодинаковы.

Итак, с практической точки зрения наибольшую ценность представляет конструкция с двумя противовесами (см. рисунок 31 приложения Б). В ней противовесы расположены на штоках, которые составляют с лопастями углы 90° .

По ранее использованной методике проанализируем силы, действующие на элементы ветродвигателя. Расширим систему принятых обозначений: G_5 и G_6 – силы тяжести, образуемые противовесами C и D ; l_5 и l_6 – расстояния от точки O до центра противовесов C и D соответственно; G_7 и G_8 – составляющие сил тяжести G_5 и G_6 , направленные перпендикулярно штокам.

$$G_7 = G_5 l_5 (90^\circ - \varphi) = G_5 l_5 \cos \varphi, \quad G_8 = G_6 l_6 \sin \varphi$$

С учетом принятых обозначений суммарный вращающий момент:

$$P_0 \frac{a}{2} = G \frac{a}{2} (\sin \varphi - \cos \varphi) + G_5 l_5 \cos \varphi - G_6 l_6 \sin \varphi$$

$$\text{или} \quad P_0 = G (\sin \varphi - \cos \varphi) + \frac{2G_5 l_5}{a} \cos \varphi - \frac{2G_6 l_6}{a} \sin \varphi \quad (5.59)$$

Из выражения (4.59) можно найти G_5 , l_5 , G_6 или l_6 . Обозначив произведение $G_5 l_5 = G_6 l_6 = K$, запишем:

$$P_0 = G (\sin \varphi - \cos \varphi) + \frac{2K}{a} (\cos \varphi - \sin \varphi) \quad (5.60)$$

При неподвижных или равномерно движущихся лопастях:

$$G (\sin \varphi - \cos \varphi) = -\frac{2K}{a} (\cos \varphi - \sin \varphi) \quad (5.61)$$

$$\text{или} \quad G (\sin \varphi - \cos \varphi) = \frac{2K}{a} (\sin \varphi - \cos \varphi) \quad (5.62)$$

Из равенства (5.62) найдем: $K = \frac{Ga}{2}$.

Кривую функции (5.60) в данном случае строить бессмысленно, поскольку при выполнении равенства $G = \frac{2K}{a}$ она во всех точках совпала бы с осью абсцисс. Это свидетельствует о том, что при всех значениях φ лопасти ветродвигателя оказываются уравновешенными.

Для оперативного поиска параметров противовесов построена номограмма, представленная на рисунке 32 приложения Б. Перед использованием номограммой необходимо найти величину $\frac{Ga}{2} = \frac{mga}{2}$, а затем, обратившись к соответствующей кривой, подобрать наиболее удобное сочетание G_5 и l_5 .

Для обеспечения уверенного начала движения лопастей при их переориентации не следует стремиться к полному уравниванию конструкции. Например, можно выбирать такое сочетание параметров противовесов, которое определяло бы уравнивание только на 90...95%. Оставшейся доли неуравновешенности вполне достаточно для образования вращающего момента, способного преодолеть трение в подшипниках горизонтального вала и обеспечить начало движения лопастей.

При проектировании ветродвигателей следует иметь в виду, что с точки зрения статического уравнивания расстояние от места крепления штоков к горизонтальному валу до его центра никакой роли не играет. В то же время оно существенно влияет на динамические показатели

Выводы:

При использовании противовесов в силовых ветродвигателях с периодически меняющимися активными поверхностями лопастей кинетическая энергия ветра расходуется главным образом на создание вращающего момента относительно вертикальной оси. Незначительная часть энергии, расходуемая на пространственную переориентацию лопастей, тратится исключительно на преодоление сил трения в подшипниках горизонтального вала. При этом эффект от использования противовесов с увеличением массы лопастей ветродвигателя возрастает. Таким образом, использование противовесов обеспечивает повышение эффективности преобразования кинетической энергии воздушного потока, что особенно важно для сохранения работоспособности ветродвигателей при слабом ветре.

5.5 Обоснование параметров уравнивающей системы в силовых ветродвигателях со взаимно-перпендикулярными валами

Рассматриваемый ветродвигатель [321] содержит вертикальный вал и перпендикулярный ему горизонтальный вал, установленный на вертикальном валу с помощью втулки. В состав ветродвигателя входят две плоские лопасти, укрепленные на горизонтальном валу под углом 90° друг к другу. В пазу втулки находится штифт, соединенный с вертикальным валом и ограничивающий поворот лопастей относительно продольной оси горизонтального вала. В работе [187] определена скорость ветра, необходимая для осуществления этого поворота при обозначениях: m – масса одной лопасти, кг; g – ускорение свободного падения, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; φ – угол, образуемый боковой стороной поднимающейся лопасти с вертикальным валом; c_x – коэффициент лобового сопротивления; b – ширина лопасти (длина верхней или нижней части стороны лопасти), м; l – длина лопасти, м; ρ – плотность воздуха, $\rho = 1.23 \text{ кг/м}^3$.

В результате воздействия сил тяжести и ветра на лопасти ветродвигателя образуются вращающие моменты относительно продольной оси горизонтального вала:

$M_1 = G \frac{a}{2} \sin \varphi$ – вращающий момент, обусловленный действием силы тяжести на нижнюю часть поднимающейся лопасти, где a – длина части боковой стороны лопасти, расположенной ниже горизонтального вала ($a = \frac{5}{6} l$, где l – длина боковой стороны лопасти); G – сила тяжести, действующая на часть лопасти, расположенную ниже горизонтального вала ($G = \frac{5}{6} mg$);

$M_2 = G \frac{a}{2} \sin(90^\circ - \varphi) = G \frac{a}{2} \cos \varphi$ – вращающий момент, обусловленный действием силы тяжести на нижнюю часть опускающейся лопасти;

$M_3 = P_0 \frac{a}{2} \cos^2 \varphi$ – вращающий момент, обусловленный давлением ветра на нижнюю часть поднимающейся лопасти, где P_0 – давление ветра на нижнюю

часть лопасти при ее расположении, перпендикулярном направлению ветра;

$P_0 = c_x ab \frac{\rho}{2} V_0$, где V_0 – скорость ветра, м/с;

$M_4 = P_0 \frac{a}{2} \sin^2 \varphi$ – вращающий момент, обусловленный давлением ветра на нижнюю часть опускающейся лопасти;

$M_5 = G_1 \frac{a_1}{2} \sin \varphi$ – вращающий момент, обусловленный действием силы тяжести на верхнюю часть поднимающейся лопасти, где a_1 – длина части боковой стороны лопасти, расположенной выше горизонтального вала ($a_1 = \frac{1}{6} l$); G_1 – сила тяжести, действующая на часть лопасти, расположенной выше горизонтального вала; ($G_1 = \frac{1}{6} mg$);

$M_6 = G_1 \frac{a_1}{2} \cos \varphi$ – вращающий момент, обусловленный действием силы тяжести на верхнюю часть опускающейся лопасти;

$M_7 = P_1 \frac{a_1}{2} \cos^2 \varphi$ – вращающий момент, обусловленный давлением ветра на верхнюю часть поднимающейся лопасти; где P_1 – давление ветра на верхнюю часть лопасти при ее расположении, перпендикулярном направлению ветра;

$$P_1 = c_x a_1 b \frac{\rho}{2} V_0$$

$M_8 = P_1 \frac{a_1}{2} \sin^2 \varphi$ – вращающий момент, обусловленный давлением ветра на верхнюю часть опускающейся лопасти.

Исходя из условия равенства нулю суммы вращающих моментов, можно записать:

$$M_1 - M_2 - M_3 - M_4 - M_5 + M_6 + M_7 + M_8 = 0 \quad (5.63)$$

$$\text{или } G \frac{a}{2} \sin \varphi - G \frac{a}{2} \cos \varphi - P_0 \frac{a}{2} \cos^2 \varphi - P_0 \frac{a}{2} \sin^2 \varphi - G_1 \frac{a_1}{2} \sin \varphi + \\ + G_1 \frac{a_1}{2} \cos \varphi + P_1 \frac{a_1}{2} \cos^2 \varphi + P_1 \frac{a_1}{2} \sin^2 \varphi = 0$$

В результате преобразований получим:

$$P_0 \frac{a}{2} - P_1 \frac{a_1}{2} = G \frac{a}{2} \sin \varphi - G \frac{a}{2} \cos \varphi - G_1 \frac{a_1}{2} \sin \varphi + G_1 \frac{a_1}{2} \cos \varphi$$

или

$$\frac{25}{144} l^2 b c_x \rho V_0^2 - \frac{1}{144} l^2 b c_x \rho V_0^2 = \frac{25}{72} mgl \sin \varphi - \frac{25}{72} mgl \cos \varphi - \frac{1}{72} mgl \sin \varphi + \frac{1}{72} mgl \cos \varphi$$

$$\text{Откуда } V_0 = \sqrt{\frac{\frac{1}{3} mgl \sin \varphi - \frac{1}{3} mgl \cos \varphi}{\frac{1}{6} l^2 b c_x \rho}} = \sqrt{\frac{2mgl(\sin \varphi - \cos \varphi)}{l^2 b c_x \rho}} = \sqrt{\frac{2mg(\sin \varphi - \cos \varphi)}{l b c_x \rho}}$$

Из последнего выражения видно, что для сохранения равновесия воздушный поток должен иметь скорость

$$V_0 = \sqrt{\frac{2mg(\sin \varphi - \cos \varphi)}{l b c_x \rho}}. \text{ В то же время для переориентации лопастей в про-}$$

странстве (что необходимо при каждом полуобороте вертикального вала) должно выполняться условие:

$$V_0 > \sqrt{\frac{2mg(\sin \varphi - \cos \varphi)}{l b c_x \rho}} \quad (5.64)$$

Очевидно, что чем меньше правая часть неравенства, тем меньше скорость ветра, при которой ветродвигатель придет в движение. Из формулы (4.64) видно, что только в одной точке, где $\varphi = 45^\circ$, правая часть неравенства равна нулю. Это означает, что для начала движения лопастей при $\varphi = 45^\circ$ усилия ветра не потребуются (без учета инерционных свойств конструкции и сил трения). При $0 \leq \varphi \leq 45^\circ$ лопасти поворачиваются самостоятельно, под действием вращающего момента, обусловленного силой тяжести. Для поворота лопасти при $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$ скорость воздушного потока должна быть тем больше, чем больше угол φ .

Таким образом, при слабом ветре поднимающаяся лопасть не достигает положения, при котором угол между ее боковой стороной и вертикальным валом равен 90° . Аналогично опускающаяся лопасть не достигает положения, при котором угол между ее боковой стороной и вертикальным валом равен нулю. При этом штифт не достигает края паза втулки, и проекции лопастей на плос-

кость, перпендикулярную направлению ветра, будут отличаться друг от друга незначительно.

Из этого следует, что на каждом полуобороте вертикального вала в результате действия ветра на лопасть, находящуюся в нерабочем состоянии (на поднимающуюся лопасть), в известной конструкции будет образовываться тормозящий вращающий момент. В то же время, лопасть, находящаяся в рабочем состоянии (опускающаяся лопасть), не сможет работать эффективно, поскольку она не займет положения, при котором ее проекция на плоскость, перпендикулярную направлению ветра, максимальна.

Для повышения эффективности рассматриваемый ветродвигатель предложено оснастить уравнивающей системой. Эта система представляет собой два противовеса, выполненных в виде штоков с укрепленными на их концах грузами (см. рисунок 35 приложения В). При этом каждый шток установлен на горизонтальном валу с противоположной стороны от соответствующей лопасти в одной с нею плоскости. Штифт укреплен на горизонтальном валу, а на торце штифта установлена упругая пластинка с возможностью упора в вертикальный вал (см. рисунок 36 приложения В).

Ветродвигатель включает вертикальный вал 1 и перпендикулярный ему горизонтальный вал 2, установленный на вертикальном валу 1 с возможностью вращения относительно своей продольной оси. Горизонтальный вал 2 установлен с помощью втулки 3 с пазом 4, представляющим собой прорезь, параллельную вертикальному валу 1. В пазу 4 находится штифт 5, укрепленный на горизонтальном валу 2. На противоположных (относительно вертикального вала 1) сторонах горизонтального вала 2 под углом 90° друг к другу укреплены две лопасти 6 и 7. На горизонтальном валу 2, с противоположных сторон от лопастей 6 и 7 и в одних плоскостях с ними установлены противовесы 8 и 9. Противовесы 8 и 9 выполнены в виде штоков 10 и 11 с укрепленными на их концах грузами 12 и 13 соответственно.

Параметры противовесов 8 и 9 (длина штоков 10 и 11 и массы грузов 12 и 13) устанавливаются таким образом, чтобы выполнялось равенство:

$$m_2 l_2 = \frac{ml}{2}, \quad (5.65)$$

где m_2 – масса груза 12 или 13, кг; l_2 – длина штока 10 или 11, м; m – масса лопасти 6 или 7, кг; l – длина боковой стороны лопасти 6 или 7, м.

На торце штифта 5 установлена упругая пластинка 14, обращенная широкой гранью к вертикальному валу 1. Упругая пластинка 14 выполнена из прочного упругого материала, например из рессорной стали, и установлена с возможностью упора в вертикальный вал 1. Упругая пластика 14 устанавливается таким образом, чтобы ее упор в вертикальный вал 1 имел место при угле поворота горизонтального вала 2 относительно своей продольной оси, близкой к предельному (или при расположении штифта 5 вблизи края паза 4 втулки 3).

В работах [195, 122] рассмотрена последовательность работы ветродвигателя, начиная с исходного положения, при котором лопасти 6 и 7 опущены, и их боковые стороны образуют с вертикальным валом 1 углы α_1 и α_2 , равные 45° , а штифт 5 находится в середине паза 4 втулки 3.

Основным преимуществом ветродвигателя с уравнивающей системой является повышенная эффективность использования энергии ветра, проявляющаяся в большей мощности за счет полного поднятия лопасти, находящейся в нерабочем состоянии, и полного опускания лопасти, находящейся в рабочем состоянии. Кроме того, уравнивающая система способствует сохранению работоспособности ветродвигателя при слабом ветре. Перечисленные преимущества иллюстрируются следующими рассуждениями [100].

В результате воздействия ветра на лопасти 6 и 7, а также силы тяжести на грузы 12 и 13 противовесов 8 и 9 и лопасти 6 и 7 образуются вращающие моменты относительно продольной оси горизонтального вала 2 (при рассмотрении ветродвигателя в положении, показанном на рисунке 5.16 и с учетом ранее принятых обозначений):

$M_9 = mg \frac{l}{2} \sin \alpha_2$ – вращающий момент, обусловленный действием силы тяжести на лопасть 7; $M_{10} = mg \frac{l}{2} \sin \alpha_1 = mg \frac{l}{2} \sin(90^\circ - \alpha_2) = mg \frac{l}{2} \cos \alpha_2$ – вращающий

момент, обусловленный действием силы тяжести на лопасть $M_{11} = P_2 \frac{l}{2} \cos^2 \alpha_2$ – вращающий момент, обусловленный давлением ветра на лопасть 7, где P_2 – давление ветра на лопасть при ее расположении перпендикулярно направлению ветра; $M_{12} = P_2 \frac{l}{2} \sin^2 \alpha_2$ – вращающий момент, обусловленный давлением ветра на лопасть 6; $M_{13} = m_2 g l_2 \cos \alpha_2$ – вращающий момент, обусловленный действием силы тяжести на груз 12 противовеса 8; $M_{14} = m_2 g l_2 \sin \alpha_2$ – вращающий момент, обусловленный действием силы тяжести на груз 13 противовеса 9.

Исходя из условия статического уравнивания лопастей и противовесов, запишем:

$$M_9 - M_{10} - M_{11} - M_{12} + M_{13} - M_{14} = 0 \quad (5.66)$$

или

$$mg \frac{l}{2} \sin \alpha_2 - mg \frac{l}{2} \cos \alpha_2 - P_2 \frac{l}{2} \cos^2 \alpha_2 - P_2 \frac{l}{2} \sin^2 \alpha_2 + m_2 g l_2 \cos \alpha_2 - m_2 g l_2 \sin \alpha_2 = 0$$

$$mg \frac{l}{2} (\sin \alpha_2 - \cos \alpha_2) - P_2 \frac{l}{2} - m_2 g l_2 (\sin \alpha_2 - \cos \alpha_2) = 0$$

Откуда

$$P_2 = mg(\sin \alpha_2 - \cos \alpha_2) - \frac{2m_2 g l_2}{l} (\sin \alpha_2 - \cos \alpha_2) \quad (5.67)$$

Для того, чтобы выражение (5.67) обращалось в нуль при всех значениях α_2 (что и является условием статического уравнивания), необходимо выполнение равенства:

$$m_2 l_2 = \frac{ml}{2}$$

Полученное равенство соответствует условию (5.65), по которому предлагается подобрать параметры противовесов. Из выражения (5.67) следует, что для пространственной переориентации лопастей усовершенствованного ветродвигателя при соблюдении условия (5.65) требуется минимальное усилие ветра. Это усилие будет одинаковым для всего рабочего диапазона изменения

угла поворота лопастей ($0 \leq \alpha_2 \leq 90^\circ$) и определяется исключительно силами трения и инерционными свойствами элементов .

Таким образом, основным преимуществом ветродвигателя со взаимно-перпендикулярными валами и уравнивающей системой является его повышенная эффективность, позволяющая начинать эксплуатацию при слабом или сверхслабом ветре со скоростью $1 \dots 2$ м/с.

5.6 Минимизация межосевого расстояния двухосевых силовых ветродвигателей

Целесообразность минимизации расстояния между осями многолопастных элементов при проектировании двухосевых ветродвигателей определяется необходимостью уменьшения их массы и повышения надежности. Целью настоящих исследований является определение минимально допустимого расстояния между осями силовых двухосевых ресурсосберегающих ветродвигателей для конструкций с различным количеством лопастей [312, 137].

При решении задачи были приняты следующие допущения:

- радиусы (длины лопастей) равны между собой;
- лопастями ветродвигателя являются тонкие параллелепипеды, представляемые плоскостями и изображаемые в плане отрезками прямых;
- поперечные вибрации валов ветродвигателей отсутствуют.

Проследим вращение лопастей ветродвигателя по рисунку 5.9.

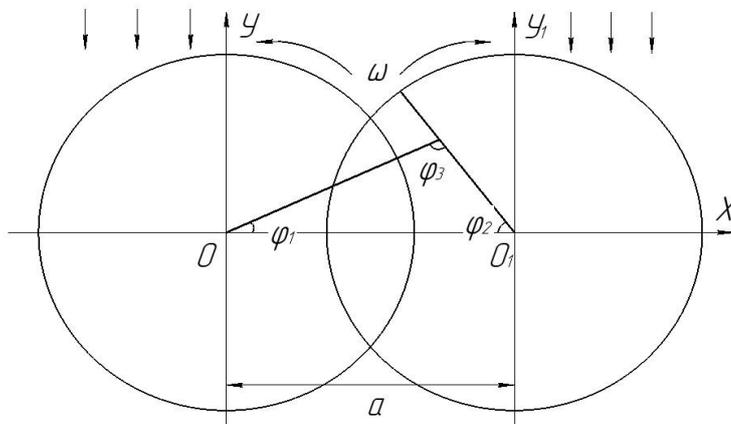


Рисунок 5.9 – План начального расположения лопастей

Обозначим: a – межосевое расстояние; α – угол между положительным направлением оси абсцисс и рассматриваемой лопастью правого многолопастного элемента; β – угол между рассматриваемыми лопастями.

При повороте элементов ветродвигателя на угол ωt лопасти займут положение, показанное на рисунке 37 приложения В. Для этого положения можно записать: $\varphi_1 = \omega t$ и $\varphi_2 = \omega t + \beta$. Будем считать, что точка возможного соприкосновения находится на лопасти правого многолопастного элемента. Обозначим эту точку буквой C , а расстояние от этой точки до осей (OC и O_1C) – символами r_1 и r_2 соответственно.

Принимая во внимание теорему синусов для треугольника OCO_1 запишем:

$$\frac{r_1}{\sin \varphi_2} = \frac{a}{\sin \varphi_3} = \frac{r_2}{\sin \varphi_1} \quad (5.68)$$

Равенства (5.68) сгруппируем попарно:

$$\begin{cases} \frac{r_1}{\sin \varphi_2} = \frac{a}{\sin \varphi_3} \\ \frac{r_2}{\sin \varphi_1} = \frac{a}{\sin \varphi_3} \end{cases}$$

Или

$$\begin{cases} r_1 = \frac{a \sin \varphi_2}{\sin \varphi_3} \\ r_2 = \frac{a \sin \varphi_1}{\sin \varphi_3} \end{cases} \quad (5.69)$$

Учитывая равенство суммы углов в треугольнике значению π , запишем:

$$\varphi_3 = \pi - \varphi_1 - \varphi_2 .$$

Соответственно $\sin \varphi_3 = \sin(\varphi_1 + \varphi_2)$. Как было установлено ранее, $\varphi_1 = \omega t$ и $\varphi_2 = \omega t + \beta$. Следовательно, $\varphi_1 + \varphi_2 = 2\omega t + \beta$.

С учетом полученных выражений систему уравнений (5.69) можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} r_1 = \frac{a \cdot \sin(\omega t + \beta)}{\sin(2\omega t + \beta)} \\ r_2 = \frac{a \cdot \sin \omega t}{\sin(2\omega t + \beta)} \end{cases} \quad (5.70)$$

При $\omega = 1$ система (5.70) сведется к виду:

$$\begin{cases} r_1 = \frac{a \cdot \sin(t+\beta)}{\sin(2t+\beta)} \\ r_2 = \frac{a \cdot \sin t}{\sin(2t+\beta)} \end{cases} \quad (5.71)$$

Отметим, что если рассматриваемые лопасти при некотором значении угла β пересекутся, то пересечение будет иметь место и при любых других углах β_1 при выполнении неравенства $\beta_1 < \beta$. Очевидно, что оптимальным будет такое взаимное расположение многолопастных элементов, при котором лопасть одного из них, находясь на минимальном расстоянии от центра другого, расположится на биссектрисе угла, образуемого его лопастями (см. рисунок 38 приложения В). Например, для трехлопастных многолопастных элементов $\beta = \pi/3$.

Обозначим длину лопасти символом R , которая в отличие от величин r_1 и r_2 при любом положении останется неизменным.

Нетрудно заметить, что если при некотором значении t лопасти пересекутся, то $r_1 \leq R$ и $r_2 \leq R$. Верным окажется и обратное утверждение: если при некотором значении t выполняется условие $r_1 \leq R$ и $r_2 \leq R$, то лопасти ветродвигателя пересекутся. Поскольку $r_2 \leq r_1$ (при условии, что $\varphi_1 \geq 0$ и $\varphi_2 \geq \pi/2$) пересечение лопастей произойдет в том и только в том случае, если $\min r_1(t) \leq R$. При этом $0 \leq t \leq \frac{\pi}{2} - \beta$.

Очевидно, что межосевое расстояние можно увеличивать в пределах сохранения неравенства $\min r_1(t) \leq R$. Однако это увеличение возможно только при соблюдении условия пересечения лопастей. Из этого заключения можно сделать вывод, что максимальное значение a , при котором лопасти пересекаются, будет соответствовать равенству $\min r_1(t) = R$.

$$\text{Тогда } \begin{cases} r_1(t) = R \\ r_1'(t) = 0 \end{cases} \quad (5.72)$$

Принимая во внимание первое из уравнений системы (4.71), представим систему (5.72) в виде:

$$\begin{cases} \frac{a \cdot \sin(t+\beta)}{\sin(2t+\beta)} = R \\ \frac{dr_1}{dt} = a \frac{\cos(t+\beta)\sin(2t+\beta) - 2\cos(2t+\beta) \cdot \sin(t+\beta)}{\sin^2(2t+\beta)} \end{cases} \quad (4.73)$$

Выразим $\sin(t + \beta)$ из первого уравнения системы (5.73) и подставим полученное выражение в ее второе уравнение:

$$\begin{cases} \sin(t + \beta) = \frac{R \cdot \sin(2t + \beta)}{a} \\ \frac{dr_1}{dt} = a \frac{\cos(t + \beta) \cdot \sin(2t + \beta) - 2\cos(2t + \beta) \cdot \left[\frac{R\sin(2t + \beta)}{a} \right]}{\sin^2(2t + \beta)} \end{cases}$$

Теперь это уравнение представляет собой дробь, которая обращается в нуль при равенстве нулю ее числителя:

$$a[\cos(t + \beta)] \cdot \sin(2t + \beta) - \frac{2R\sin(2t + \beta) \cdot \cos(2t + \beta)}{a} = 0$$

В результате несложных преобразований будем иметь:

$$\sin(2t + \beta) \cdot [a \cdot \cos(t + \beta) - 2R \cdot \cos(2t + \beta)] = 0 \quad (5.74)$$

Поделив выражение (5.74) на $\sin(2t + \beta)$, получим:

$$a \cdot \cos(t + \beta) - 2R \cdot \cos(2t + \beta) = 0 \quad (5.75)$$

Представим первое уравнение системы (5.73) в виде:

$$a \cdot \sin(t + \beta) = R \cdot \sin(2t + \beta) \quad (5.76)$$

На основе уравнений (5.75) и (5.76) сформируем новую систему:

$$\begin{cases} a \cdot \cos(t + \beta) - R \cdot \sin(2t + \beta) = 0 \\ a \cdot \cos(t + \beta) - 2R \cdot \cos(2t + \beta) = 0 \end{cases} \quad (5.77)$$

В результате деления первого уравнения системы (5.77) на второе получим:

$$2tg(t + \beta) - tg(2t + \beta) = 0 \quad (5.78)$$

Преобразуем выражение (5.78), используя формулу «тангенса суммы двух углов»:

$$2 \frac{tgt+tg\beta}{1-tgt\cdot tg\beta} = \frac{tg2t+tg\beta}{1-tg2t\cdot tg\beta} \quad (5.79)$$

В соответствии с формулой «тангенса двойного угла» для правой части уравнения (5.79) запишем:

$$2 \frac{tg t + tg \beta}{1 - tg t \cdot tg \beta} = \frac{\frac{2tg t}{1 + tg^2 t} + tg \beta}{1 - \frac{2tg t}{1 - tg^2 t} \cdot tg \beta}$$

Откуда

$$2(tg t + tg \beta) \cdot (1 - tg^2 t - 2tg t \cdot tg \beta) = (1 - tg t \cdot tg \beta) \cdot (2tg t + tg \beta - tg^2 t \cdot tg \beta) \quad (5.80)$$

После раскрытия скобок и переноса всех членов уравнения (4.80) в левую часть получим:

$$2tg t - 2tg^3 t - 4tg^4 \cdot tg \beta + 2tg \beta - 2tg \beta \cdot tg^2 t - 4tg t \cdot tg^2 \beta - 2tg t - tg \beta + tg^2 t \cdot tg \beta + 2tg^2 t \cdot tg \beta + tg t \cdot tg^2 \beta - tg^3 t \cdot tg^2 \beta = 0$$

Сгруппируем члены последнего уравнения относительно $tg^3 t$, $tg^2 t$ и $tg t$ и умножим их на -1 :

$$(2 + tg^2 \beta) \cdot tg^3 t + 3tg \beta \cdot tg^2 t + 3tg^3 \beta \cdot tg t - tg \beta = 0 \quad (5.81)$$

Введем обозначения: $u = tg \beta$; $z = tg t$.

Теперь уравнение (5.81) можно представить в виде:

$$(2 + u^2)z^3 + 3uz^2 + 3u^2z - u = 0 \quad (5.82)$$

Для получения окончательного ответа необходимо решить кубическое уравнение (5.82) и найти величину t для ветродвигателей с различным количеством лопастей. Затем следует выразить критическое значение межосевого расстояния a из первого уравнения системы (5.79) и подставить в полученное выражение найденное значение t .

Итак, для традиционного ветродвигателя ($n = 3$; $\beta = 60^\circ$) можно записать:

$$u = tg \beta = 1,73$$

Тогда уравнение (5.82) примет вид:

$$5z^3 + 5,2z^2 + 9z - 1,73 = 0$$

Решениями уравнения будут являться корни:

$$z_{1,2} = -606 \cdot 10^{-1} \pm j1,28; \quad z_3 = 1,72 \cdot 10^{-1}$$

Принимая во внимание только вещественный корень, и учитывая, что $z = tg t$, найдем t :

$$t = \arct z = \arctg 1,72 \cdot 10^{-1} = 9,78^\circ$$

Из первого уравнения системы (5.73) можно записать:

$$a = \frac{R \sin(2t + \beta)}{\sin(t + \beta)}$$

Подставив численные значения t и β , получим: $a_3 \cong 1,052R$

Аналогичные рассуждения для четырехлопастного ветродвигателя ($n = 4$; $\beta = 45^\circ$) приведут к следующим результатам:

$$u = \operatorname{tg} \beta = 1$$

$$3z^3 + 3z^2 + 3z - 1 = 0$$

$$z_{1,2} = -6,27 \cdot 10^{-1} \pm j9,62 \cdot 10^{-1}; z_3 = 2,53 \cdot 10^{-1}$$

$$t = \operatorname{arctg} z = \operatorname{arctg} 2,53 \cdot 10^{-1} = 14,2^\circ$$

$$a_4 \cong 1,12R$$

Для пятилопастного ветродвигателя ($n = 5$; $\beta = 36^\circ$):

$$u = \operatorname{tg} \beta = 0,73$$

$$2,53z^3 + 2,17z^2 + 1,58z - 0,73 = 0$$

$$z_{1,2} = -5,49 \cdot 10^{-1} \pm j7,96 \cdot 10^{-1}; z_3 = 2,96 \cdot 10^{-1}$$

$$t = \operatorname{arctg} z = \operatorname{arctg} 2,96 \cdot 10^{-1} = 16,5^\circ$$

$$a_5 \cong 1,23R$$

Для шестилопастного ветродвигателя: ($n = 6$; $\beta = 30^\circ$):

$$u = \operatorname{tg} \beta = 0,58$$

$$u = \operatorname{tg} \beta = 0,73$$

$$2,33z^3 + 1,73z^2 + 9,98 \cdot 10^{-1}z - 5,77 = 0$$

$$z_{1,2} = -5,32 \cdot 10^{-1} \pm j6,98 \cdot 10^{-1}; z_3 = 3,21 \cdot 10^{-1}$$

$$t = \operatorname{arctg} z = \operatorname{arctg} 3,21 \cdot 10^{-1} = 17,8^\circ$$

$$a_6 \cong 1,23R$$

Нетрудно заметить, что с увеличением количества лопастей минимально допустимое межосевое расстояние возрастает. Эту зависимость можно проследить по результатам расчета, сведенным в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Зависимость расчетных значений критических межосевых расстояний от количества лопастей

Количество лопастей (n)	Угол между лопастями (β), градусы	Критическое межосевое расстояние
2	90	R
3	60	$1,04R$
4	45	$1,12R$
5	36	$1,18R$
6	30	$1,23R$

Подводя итог аналитическому исследованию, сделан вывод, что двухосевые ресурсосберегающие ветродвигатели характеризуются повышенной эффективностью за счет взаимного перекрывания лопастей на межосевом пространстве. По схематичному изображению такой конструкции на рисунке 39 приложения В видно, что тормозящий момент, образуемый на участке OO_1 , оказывается меньше суммы полезных вращающих моментов. При этом направление ветра перпендикулярно отрезку OO_1 , а полезный вращающий момент образуется неперекрывающимися лопастями на участках OM и O_1N . Дополнительное повышение эффективности такого ветродвигателя происходит при установке заградительного экрана на некотором расстоянии от отрезка OO_1 . Такая мера не изменяет сумму полезных вращающих моментов, но существенно уменьшает тормозящий момент.

Для проверки результатов аналитического исследования произведено компьютерное моделирование процесса вращения многолопастных элементов ветродвигателя [106].

На первом этапе моделирования осуществлялось формирование условий, определяющих факт пересечения лопастей. В процессе моделирования лопасти левого и правого многолопастных элементов рассматривались как векторы OA и O_1B , исходящие из начал координат YOX и Y_1O_1X и образующие с отрезком OO_1 углы φ_1 и φ_2 соответственно (рисунок 40 а и рисунок 40 б приложения В).

Уравнения прямых, по которым проходят исследуемые векторы, можно представить в виде:

$$\begin{cases} y = k_1 x \\ y = k_2(x - a) \end{cases} \quad (5.83)$$

где a – расстояние между осями; $a = OO_1$;

k_1 и k_2 – угловые коэффициенты прямых; $k_1 = \operatorname{tg} \varphi_1$ и $k_2 = \operatorname{tg} \beta = -\operatorname{tg} \varphi_2$.

В результате подстановки значений угловых коэффициентов в уравнения системы (4.83) получим:

$$\begin{cases} y = x \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 \\ y = (x - a) \cdot (-\operatorname{tg} \varphi_2) \end{cases} \quad (5.84)$$

Координаты точки пересечения прямых определим приравниванием правых частей уравнений системы (5.84):

$$x \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 = (x - a) \cdot (-\operatorname{tg} \varphi_2)$$

Откуда

$$\begin{cases} x = \frac{a \cdot \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_2} \\ y = \frac{a \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_2} \end{cases} \quad (5.85)$$

Однако система (5.85) еще не исчерпывает все условия пересечения лопастей. Пока она определяет только условия пересечения бесконечно длинных прямых. Для перехода от бесконечно длинных прямых к векторам необходимо ввести ограничения по длине.

Рассматривая рисунок 5.22 б, можно заметить, что при пересечении векторов не обязательно происходит пересечение их концов. Более вероятно пересечение конца одного вектора (на рисунке 5.22 б это – вектор OA) со вторым вектором на каком-то расстоянии от конца последнего. Хотя, конечно, возможно и пересечение (точнее, касание) их концов. Математически это условие можно представить так:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 \leq R^2 \\ (x - a)^2 + y^2 \leq R^2 \end{cases} \quad (5.86)$$

где R – радиус (длина вектора); $R = OA = O_1B$.

Поскольку все члены неравенства (5.86) положительны, можно утверждать, что при выполнении первого неравенства второе будет выполнено априори. В связи с этим в качестве дополнительного условия к системе уравнений (5.85) добавим первое неравенство системы (5.86).

Очевидно, что одновременные действия с двумя углами (φ_1 и φ_2) неудобны. Поэтому в дальнейших рассуждениях будем использовать только одно обозначение. Для перехода к этому обозначению будем считать, что в начальный момент времени вектор OA расположен на оси OO_1 , а вектор O_1B образует с ней угол α . Величина этого угла может быть легко определена по соотношению:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{2n} = \frac{180^\circ}{n}$$

При повороте каждой лопасти на текущий угол φ систему уравнений (5.85) можно представить в виде:

$$\begin{cases} x = \frac{a \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)} \\ y = \frac{a \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)} \end{cases} \quad (5.87)$$

Вследствие возможности пересечения исследуемых векторов в противоположных квадрантах и получения лишних решений введем ограничение на величину максимального угла поворота: $\alpha + \varphi < 90^\circ$. В таком случае полная система уравнений, определяющих пересечение лопастей, примет вид:

$$\begin{cases} x = \frac{a \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)} \\ y = \frac{a \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)} \\ x^2 + y^2 \leq R^2 \\ (x - a)^2 + y^2 \leq R^2 \end{cases} \quad (5.88)$$

Компьютерное исследование задачи производилось численным решением этой системы в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 33 приложения Б. Пояснения к алгоритму сведены в таблице 36 приложения А.

В соответствии с алгоритмом перед началом моделирования необходимо ввести количество лопастей исследуемого ветродвигателя, а также определить

величину пошагового изменения угла поворота лопастей и пошагового уменьшения межосевого расстояния.

В процессе моделирования рассчитывались координаты точек взаимного пересечения векторов и осуществлялась проверка полученных значений на выполнение условия $x^2 + y^2 \leq R^2$. При невыполнении этого условия производился «поворот» смоделированных прямых на угол $\Delta\varphi$ и повторное обращение к описанным вычислениям. Если условие $x^2 + y^2 \leq R^2$ не выполнялось на всем диапазоне $0 < \varphi + \alpha < 90^\circ$, происходило уменьшение межосевого расстояния на величину Δa . После этого цикл вычислений возобновлялся. При выполнении условия $x^2 + y^2 \leq R^2$ вычисления прерывались и осуществлялся вывод значения межосевого расстояния, при котором это пересечение произошло. Если при повороте лопастей на угол $\pi/2$ пересечение не наблюдалось, они переводились в исходное положение. После этого расстояние между осями уменьшалось, и поворот возобновлялся. Зафиксированное значение расстояния между точками начала векторов, при котором произошло их пересечение, предлагается рассматривать как минимально допустимое межосевое расстояние для ветродвигателя с заданным количеством лопастей

В результате компьютерного моделирования получились следующие значения минимально допустимых межосевых расстояний:

при $n = 3$ $a = 1,048R$, при $n = 4$ $a = 1,116R$, при $n = 5$ $a = 1,176R$; при $n = 6$ $a = 1,229R$.

Как видим, результаты компьютерного моделирования и аналитического исследования совпадают до второго знака после запятой.

Перед использованием программы необходимо установить следующие начальные условия: количество вращающихся векторов (n), угол смещения второй группы векторов (угол между линией, являющейся продолжением отрезка прямой, соединяющей центры многолопастных элементов и вектором, расположенным в наибольшей близости к ней в направлении против часовой стрелки), расстояние между осями (a) и интервал для вывода графической информации ($\Delta\varphi$). Завершив ввод начальных условий, следует нажать на клавишу

«S», после чего на мониторе появится изображение вращающихся лопастей. При наблюдении за их движением легко зафиксировать факт пересечения. В процессе работы программы, не прерывая вращение виртуальных лопастей, можно корректировать параметры модели. Так, например, изменение интервала вывода графической информации достигается клавишами «+» или «-», изменение угла смещения второй группы векторов – нажатием клавиши «)» или «(» и изменение расстояния между осями – нажатием клавиш «>» или «<». Остановить и вновь запустить вращение лопастей можно с помощью клавиши «S».

Некоторое ограничение использования алгоритма по рисунку 33 приложения Б связано с низким быстродействием при его реализации. Для исследования движения лопастей на четверти периода алгоритм предусматривает анализ $\frac{\pi/2}{k \cdot l}$ позиций, где k – величина пошагового приращения угла поворота лопастей, рад; l – величина пошагового уменьшения межосевого расстояния, в долях от R . При этом продолжительность машинного счета становится значительной. Например, исследование только одного ветродвигателя на современном персональном компьютере при $k = 1,745 \cdot 10^{-3}$ рад ($0,1^\circ$) и $l = 0,001R$ длится 3...4 часа. Естественно, что для постоянного или частого обращения алгоритм неудобен.

На рисунке 34 приложения Б представлена версия ускоренного алгоритма, в которой предусматривается автоматическое изменение величин пошаговых приращений k и l . Пояснения к алгоритму даны в таблице 37 приложения А.

Последняя версия предполагает многоступенчатый перебор исследуемых позиций. Сначала производится испытанный поворот лопастей навстречу друг другу. При отсутствии пересечения расстояние между осями уменьшается (блоки 6...8 и 14...16). Однако в отличие от прежнего алгоритма движение к точке пересечения происходит крупными шагами, а потому более интенсивно. В случае пересечения лопастей делается шаг назад: лопасти перемещаются в обратном направлении на величину однократного приращения угла и межосе-

вого расстояния (блоки 9...11 и 21). Далее величина пошагового уменьшения межосевого расстояния сокращается в 10 раз (блок 22), и поворот лопастей навстречу друг другу возобновляется. При следующем пересечении лопастей происходит повторный шаг назад, как и в предшествующем случае (блок 19). Но теперь в 19 раз сокращается приращение угла поворота (блок 20). Вслед за этим начинается движение лопастей в прямом направлении, и все операции еще раз повторяются.

Таким образом, в процессе машинного счета сначала происходит стремительное, но грубое приближение к искомой точке, а затем поэтапное уменьшение итераций и уточнение результата. При этом продолжительность анализа одного ветродвигателя не превышает двух минут [106, 139].

Версия ускоренного алгоритма, а также соответствующая программа позволили исследовать общую закономерность изменения межосевого расстояния в широком диапазоне количества лопастей.

В таблице 38 приложения А представлены результаты расчета для случаев $2 \leq n \leq 1300$. Не вызывает сомнений практическое применение тех результатов, которые получены при небольших значениях n . Вместе с тем, остальные варианты также небезынтересны, поскольку иллюстрируют стремление межосевого расстояния к удвоенному радиусу ветроколеса при бесконечном увеличении количества лопастей: $a = R$ при $n = 2$ и $a \rightarrow 2R$ при $n \rightarrow \infty$

Зависимость $a = f(n)$ для диапазона $2 \leq n \leq 25$ представлена графически на рисунке 35 приложения Б. Из графика видно, что исследуемая зависимость является гладкой, монотонной и легко аппроксимируемой математической формулой. При выборе общего вида этой формулы принималось во внимание, что она должна быть достаточно точной, максимально простой, легко запоминающейся и не содержать большого количества численных параметров. Широко распространенная полиномиальная аппроксимация перечисленным требованиям не удовлетворяет, поскольку для достижения высокой точности потребует определения, как минимум, трех-четырёх коэффициентов довольно широкого формата.

Для выбора наиболее удачной формулы примем новую систему координат, в которой исходную кривую заменим прямой линией. Через начальную ($n = 2; a = R$) и конечную ($n = 25; a = 1,607 \cdot R$) точки исходной кривой проведем прямую линию, а затем вычислим отклонение (E) средней точки исходной кривой ($n = 11; a = 1,404 \cdot R$) от искусственной прямой [168]. Наиболее удачной двухпараметрической функцией из ряда $a = AB^n; a = AB^{n^2}; a = AB^{\frac{1}{n}}; a = An^B; a = \frac{1}{A+Bn}; a = \frac{1}{A+Bn^2}; a = \frac{n}{An+B}; a = \frac{1}{A+B \lg n}; a = \sqrt{A+Bn}; a = \sqrt{A+Bn^2}; a = \sqrt{A+\frac{B}{n}}; a = \sqrt{A+B \cdot \lg n}; a = A+Bn; a = A+Bn^2; a = A+\frac{B}{n}; a = A+B \cdot \lg n$ будем считать такую, для которой величина E минимальна.

Присвоим исследуемым функциям номера в соответствии с последовательностью перечисления. Величины E для этих функций сведем в таблицу 49 приложения А

Из приведенного перечня наиболее удачной признаем функцию $a = A + B \cdot \lg n$, для которой методом наименьших квадратов найдены параметры A и B ($A = 7,77 \cdot 10^{-1}; B = 5,98 \cdot 10^{-1}$). В результате подстановки в полученную модель аргументов $n = 2, 3, 4, \dots, 25$ и расчета теоретических значений функции с последующим их сравнением с исходными величинами делаем вывод об удовлетворительном качестве аппроксимации. Следует отметить, что в некоторых точках (при $n = 2; n = 10; n = 11; n = 14 \dots 20$) все-таки наблюдается небольшое (в пределах 4,4%) отклонение расчетных значений от исходных данных. На практике такое отклонение может оказаться роковым и привести к повреждению лопастей. Поэтому далее предпримем искусственное смещение исходных данных с повторной аппроксимацией. При этом смещение произведем в сторону увеличения численных значений массива на величину максимального расхождения исходных данных с ранее полученными расчетными значениями. Максимальное расхождение имеет место в точке $[a_1; n_1]$ и соответствует 0,044. Для аппроксимации смещенного массива вновь используем

логарифмическую функцию, для которой $A_1 = 8,21 \cdot 10^{-1}$ и $B_1 = 5,98 \cdot 10^{-1}$. Первоначальные исходные данные, их смещенные величины, а также расчетные значения по модели $a_p = A_1 + B_1 \lg n$ представлены в таблице 1 приложения. В этой же таблице приведены значения погрешности аппроксимации – расхождения (в процентах) расчетных значений a_p от первоначальных исходных данных. Как видно из таблицы 5.7, максимальная погрешность аппроксимации не превышает 5,92%. При этом ни одна из расчетных величин a_p не оказалась выше соответствующих исходных значений $a_{и}$. Правда, в связи с предпринятым смещением исходного массива расчетные значения a_p получились несколько завышенными. Однако это не должно мешать практическому использованию модели, поскольку получаемые по ней минимально допустимые межосевые расстояния теперь могут трактоваться как требуемые. А если принять во внимание, что исходные данные рассчитывались исходя из допущений о бесконечно тонких лопастях и отсутствии поперечных вибраций валов ветродвигателя, то такое завышение представляется вполне оправданным.

Итак, зависимость межосевого расстояния от количества лопастей при $2 \leq n \leq 25$ может быть вычислено по формуле $a = (A_1 + B_1 \lg n)R$, где $A_1 = 8,21 \cdot 10^{-1}$ и $B_1 = 5,98 \cdot 10^{-1}$. При проектировании двухосевых ветродвигателей с числом лопастей, превышающем 25, можно рекомендовать обратиться к выражению (5.82), таблице 5.7 или воспользоваться программой.

Выводы:

1. Ресурсосберегающие двухосевые ветродвигатели с параллельными осями, расположенными перпендикулярно направлению ветра и содержащие многолопастные элементы с частичным взаимоперекрыванием лопастей, способствуют эффективному использованию пространства, а применение в них заградительного экрана не является обязательным.
2. При увеличении количества лопастей от двух до бесконечности минимально допустимые расстояния между осями многолопастных элементов увеличивается в диапазоне от радиуса до удвоенного радиуса.

3. Минимально допустимое расстояние между осями двухосевого ветродвигателя может быть определено по результатам приведенных теоретических расчетов или пошагового исследования движения лопастей, оценено по факту пересечения виртуальных лопастей при компьютерном моделировании процесса, а также вычислено (в долях от радиуса ветродвигателя) по сумме $A+B \lg n$, где n – количество лопастей, а A и B – параметры с численными значениями $8,21 \cdot 10^{-1}$ и $5,98 \cdot 10^{-1}$ соответственно.

Выводы по главе 5

1. Сбережение окружающего пространства как природного ресурса при преобразовании кинетической энергии ветра может быть достигнуто при использовании ветродвигателей, основанных на силовых свойствах ветра. При этом эффективность работы ветродвигателей может быть оценена по величине активной поверхности лопастей, а коэффициент использования энергии ветра определен функцией соотношения частоты вращения лопастей, их размеров и линейной скорости воздушного потока.
2. Для обеспечения работоспособности силовых ветродвигателей с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей при низких скоростях ветра, а также для уменьшения пульсаций и акустических помех целесообразно использование нескольких пар смещенных в пространстве лопастей и уравновешивающих систем с упругими элементами
3. Двухосевые силовые ветродвигатели с параллельными валами и частично перекрывающимися лопастями обеспечивают эффективное использование рабочего пространства за счет уменьшения расстояния между осями и исключения необходимости использования заградительного экрана.
4. Обоснован способ оценки эффективности силовых ветродвигателей по величине активной поверхности лопастей, разработаны методика расчета коэффициента использования энергии ветра силовыми ветродвигателями, методика определения параметров уравновешивающей системы силовых ветродвигателей с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей, методика

расчета минимально допустимого расстояния между осями многолопастных двухосевых ветродвигателей.

Глава 6. Перспективные направления разработки электротехнологических способов и технических средств ресурсо-энергосбережения в АПК

6.1 Энергосберегающее осушения воздуха на объектах АПК

Рассматриваемый энергосберегающий способ осушения воздуха основан на перераспределении затратных составляющих в правой части первого уравнения совокупности (2.1):

$$E(t) = (k_1 \frac{d\varphi_1}{dt} + k_2 \frac{dx_1}{dt} + k_3 \frac{dz_1}{dt})k_5 \cdot \xi_1 + k_4$$

При реализации адсорбционного способа осушения воздуха происходит поглощение взвешенной влаги сухим адсорбентом и его последующая регенерация посредством нагрева при затрачивании тепловой энергии $k_3 k_5 \cdot \xi_1 \frac{dz_1}{dt}$. Для достижения энергосбережения на этапе регенерации адсорбента могут быть использованы иные способы, в частности – ультразвуковые воздействия или озонирование регенеративного плеча.

При разработке нового способа осушения воздуха были приняты во внимание три известных приема воздействия на влагосодержание газов: ассимиляция, конденсация и адсорбация. Ассимиляция на практике не всегда эффективна, поскольку способность поглощения воздухом водяных паров ограничена и не постоянна, а сам способ является весьма энергозатратным. Недостатком конденсационного способа является повышенный шум, невысокая производительность и резкое снижение эффективности при температурах осушаемого воздуха ниже 20°C. Серьезной проблемой на пути к внедрению адсорбционных осушителей является высокое энергопотребление. При работе адсорбционных осушителей энергия затрачивается на осуществление четырех операций: на вращение барабана, на подачу осушаемого воздуха, на разогрев воздуха в рециркуляционном плече и на его подачу. Из перечисленных операций наиболее энергоемкой является нагрев воздуха, расходуемого на регенерацию силикагеля. При этом нагреву до 150°C подлежат около 25...30% от количества воздуха, циркулирующего в основном контуре. С целью уменьшения энергоемкости способа необходимо заменить нагрев регенерационного возду-

ха на иной прием интенсификации сушки адсорбирующего вещества. Перспективным направлением снижения энергоемкости адсорбционной сушки является использование в рециркуляционном плече озono-воздушной смеси.

Экспериментальная проверка сушки селикагеля в озono-воздушной среде показала наличие положительного эффекта при концентрации озона начиная с $10..15 \text{ мг/м}^3$ и его устойчивое повышение в интервале до 100 мг/м^3 [223, 46, 160].

В результате изучения механизма взаимодействия озона с твердым веществом и водой в различных фазах были выявлены три обстоятельства, определяющие возникновение осушаемого эффекта [222, 243].

Первое из них обусловлено изменением состояния воздушной среды с селикагелем. Под действием озона в газовой фазе происходит образование активных центров [95, 94]. В этих центрах влага конденсируется, а составляющие ее молекулы объединяются в микрокапли. Эффективная концентрация воды в воздухе снижается, а влажностный напор на границе осушаемого селикагеля и воздушной среды возрастает. Под действием повышенного градиента влажности поглощение воды из селикагеля ускоряется. Таким образом, рассматриваемый фактор определяет косвенный механизм влияния озона на эффективность осушения селикагеля.

Второе обстоятельство обусловлено воздействием озона на энергетические свойства поверхностного слоя испаряющейся влаги. Находясь в окрестности осушаемого селикагеля, озон выступает поверхностно-активным веществом. Изменение величины поверхностного натяжения воды связано с изменением ее поверхностной энергии или энергии поверхностного слоя. Учитывая это обстоятельство, можно считать, что озон, оказываясь в окрестности осушаемого селикагеля, играет роль такого поверхностно активного вещества. Являясь химически неустойчивым активным компонентом, озон либо вступает в химические реакции на поверхности содержащейся в селикагеле влаги, либо адсорбируется и забирает часть энергии с ее поверхности. Эта

часть энергии необходима озону для перехода в более устойчивую, молекулярную форму.

Третье обстоятельство связано с изменением вероятности преодоления молекулой воды силы поверхностного натяжения при испарении, подчиняющееся распределению Гаусса. Преодолеть энергию поверхностного слоя суждено только тем молекулам, энергии которых находятся на пике или в окрестности пика этого распределения. При внесении озона в воздушную среду энергия поверхностного слоя уменьшается, а вероятность превышения собственных энергий молекул некоторого порогового значения возрастает. Таким образом, способность преодоления энергетического барьера теперь могут молекулы, имеющие меньшую энергию, то есть процесс выделения влаги пойдет более интенсивно.

Использование озона по сравнению с твердыми поверхностно активными веществами более эффективно, так как газообразный озон обеспечивает гораздо большую равномерность воздействия. Кроме того, процедура получения озона на сегодня достаточно проста и не требует ощутимых энергетических затрат. Наконец, использованный в осушении озон своим присутствием, как правило, не нарушает основной технологический процесс и с течением времени разлагается. При этом никаких следов присутствия озона в осушаемой среде не остается.

Четвертое обстоятельство основано на проявлении физического эффекта ионизации воздуха. По общепринятой теории ионизированные молекулы воздуха способны изменять электрические свойства поверхностей. Известно, что на поверхности клетки растительного или животного происхождения имеется двойной подвижный электрический слой. Этот слой образуется ионами одного знака внутри пленки и другого знака – на ее поверхности. Кроме того, электрический слой с обеих сторон клеточной мембраны может быть образован ионами одного знака, но при их различных концентрациях. Например, в физике хорошо описан процесс проникновения ионов натрия в клетку или уход из нее. Этот процесс меняет напряжение электрического

слоя и приводит к запиранию диффузии через клеточную мембрану. А диффузия, в свою очередь, предотвращает либо проникновение вещества внутрь, либо его выход наружу. Таким образом, ионизация среды способна как ускорять, так и замедлять сушку. Доказательством справедливости этой теории является зависимость интенсивности сушки от концентрации озона. Кроме того установлено, что при превышении концентрации озона некоторого критического значения эффект сушки будет менять свой знак, и интенсивность процесса уменьшается.

Селикагель представляет собой коллоидную силикатную структуру, которая поглощает воду за счет многочисленных и довольно разветвленных пор. Своеобразие структуры селикагеля пределяет большую вероятность именно физической сущности эффекта сушки. Селикагель – это твердый коллоидный раствор поликремниевых кислот, степени окисления кремния и водорода в которых максимальна, а вероятность окисления озоном кислорода в степени окисления – 2 невелика. Также невелика вероятность химических процессов, происходящих за счет примесей или инородных элементов. Однако в классическом селикагеле доля таких примесей очень мала. Поэтому эффекты запирания или ускорения движения заряженных молекул, проявляющиеся в замедлении или ускорении сушки, можно рассматривать как следствие явлений физической природы. Главный привлекательный фактор такого подхода заключен в исключительной дешевизне реализации тлеющего разряда. В то же время применение любых поглотительных фильтров (физических или химических) требует ощутимых затрат на их регенерацию.

Под воздействием тлеющего разряда в воздушной среде создаются центры конденсации воды, а далее процесс может идти по нескольким направлениям. Во-первых, сосредоточенная в этих центрах влага может сама по себе оседать в виде капель. Тогда на первый план выступает инженерная задача по удалению этих капель из зоны осушения. Технически это можно реализовать с помощью циркуляционного насоса или вентилятора. Во-вторых, ионизация воздуха, достигнутая в результате тлеющего разряда, может приводить

к конденсации противоположного характера. Ведь электрический разряд ускоряет разделение физических фаз. Это происходит за счет появления небольшой избыточной энергии. В этом случае стабильность в системе повышается, так как разделение фаз по механизму является ничем иным, как переходом в энергетически более выгодное состояние. Например, частицы, взвешенные в жидкости, обладают большей потенциальной энергией, чем осевшие частицы. Это объясняется тем, что при оседании частицы теряют часть потенциальной энергии. Кроме того, дополнительное уменьшение потенциальной энергии дает конденсация воды. Вода, которая находится в газообразном состоянии, в воздухе, обладает заметно большей энергией, чем та же вода в виде капель. При охлаждении газа мы получаем жидкость, при дальнейшем охлаждении жидкость превращается в твердое вещество. Это происходит в соответствии с принципом наименьшей энергии, а в соответствии с этим принципом вещество переходит в состояние с меньшей потенциальной энергией. Если искусственно формировать какой-то физический или химический толчок (в том числе и с помощью электрического разряда), то разделение фаз ускоряется. Фактически сушка и сводится к тому, что вода из воздуха выделяется в виде жидкости и суммарная энергия этой системы снижается. В связи с вышеизложенным становится очевидным, что в присутствии внешнего толчка процесс сушки активизируется.

Реализация рассмотренного способа энергосберегающего адсорбционного осушения воздуха может быть осуществлена различными техническими средствами, в которых сушильный агент в периодическом или непрерывном режиме меняет свое расположение относительно осушаемого и регенерирующего воздушных потоков [336]. Функциональная схема одного из таких устройств представлена на рисунке 41 приложения В.

На основании вышеприведенных рассуждений сделаны следующие выводы:

1. Объяснение механизма интенсификации сушки в озонированной среде можно осуществить на основе химического физического или электрофизического подхода. Накопленный к настоящему времени материал

позволяет сделать вывод о возможности использования описываемого явления в системах искусственного осушения воздуха с применением адсорбционного эффекта.

2. Ресурсосберегающее осушение воздуха на объектах АПК может быть реализовано с помощью поглощения влаги адсорбентом в виде силикагеля при последующей его регенерации без нагрева в озono-воздушной среде при концентрации озона от 10..15 мг/м³.

6.2 Электротехнологические способы и технические средства ресурсосберегающего дражирования семян

В соответствии с рассуждениями, приведенными в главе 2, для сбережения семенного материала, как важного вида биологического сырьевого ресурса, при дражировании необходимо создавать условия для повышения коэффициента k_5 и уменьшения коэффициента k_6 . во втором уравнении совокупности (2.1): $M(t) = (k_1 \frac{d\varphi_2}{dt} + k_2 \frac{dx_2}{dt})k_5 \cdot \xi_2 + k_6$. В последнем уравнении коэффициент k_5 определяет эффективность влияния характера движения семян на процесс наращивания оболочки, k_6 – масса некондиционных драже.

В работах [203, 209, 211] приведены результаты экспериментальных исследований автора режимов дражирования семян экологически чистыми диатомитно-песочными и глиняно-песочными смесями. Для исследований был использован дражиратор с барабанным рабочим органом в форме параболлоида вращения. Дано описание экспериментального дражиратора (см. рисунки 42,43 и 44 и приложения В) и сформулированы требования к качеству драже. Сделан вывод о наиболее объективной оценке качества дражированных семян по величине прочности оболочки драже (таблицы 40 и 41 приложения А). Обоснована возможность косвенной оценки качества дражирования по количеству смеси, не вступившей в процесс образования драже (КНС). При оценке количественной меры тесноты связи между КНС (Y) и усилием на разрушение оболочки (X) был рассчитан коэффициент корреляции, соответствующий 0,98.

Полученное значение свидетельствует о сильной существенной корреляционной связи Y и X . В соответствии с критерием Блэкмана посредством сравнения найденного коэффициента корреляции с и корреляционного отношения доказана линейность обнаруженной зависимости. Степень изменчивости результативного признака под воздействием исследуемого фактора рассчитывалась методом наименьших квадратов, после чего определялись коэффициенты уравнения регрессии, записанного в виде прямой.

На рисунке 36 приложения Б представлена теоретическая линия регрессии, расположенная на корреляционном поле с экспериментальными данными. КНС дает интегральную оценку качества дражирования и может быть измерен посредством взвешивания. Помимо этого, доказанная зависимость создает предпосылки автоматизации процесса. При проведении экспериментальных исследований выявлено влияние на прочность оболочки драже частоты вращения и угла наклона рабочего органа, влажности и режима подачи исходных смесей, продолжительности дражирования семян диатомитно-песочной смесью, а также состава смеси на втором этапе дражирования. (см. таблицу 42 и таблицу 43 приложения А). Для сокращения количества опытов и упрощения процедуры обработки результатов использовался метод дробно-факторного эксперимента. В результате реализации отсеивающего эксперимента было установлено, что на количество смеси, не вступившей в процесс образования драже, существенно влияют влажность исходных смесей, частота вращения рабочего органа и продолжительность дражирования диатомитно-песочной смесью. В то же время угол наклона рабочего органа к поверхности Земли, содержание диатомита в глиняно-песочной смеси и режим подачи исходных компонентов на качество исследуемого процесса не влияют. Методом крутого восхождения Бокса-Бенкина был осуществлен поиск области оптимума параметров дражирования. Для реализации метода осуществлено последовательное выполнение дробно-факторного эксперимента, статистический анализ коэффициентов выборки, обоснование шага и крутое восхождение по поверхности отклика (см. таблицу 44 и таблицу 45 приложения А). Участок поверхно-

сти отклика описывался отрезком ряда Тейлора, по коэффициентам которого было установлено, что наилучший результат достигается при влажности исходной смеси 7%, частоте вращения рабочего органа 16 м^{-1} и продолжительности первого этапа дражирования семян диатомитно-песочной смесью 18 минут. Анализ знаков коэффициентов уравнения регрессии показал, что на прочность оболочки влияет одновременное изменение влажности исходной смеси и частоты вращения рабочего органа, или влажности исходной смеси и продолжительности первого этапа дражирования на одинаковом или противоположном уровнях соответственно. Установлено, что статистически значимое изменение прочности может быть обусловлено изменением частоты вращения рабочего органа и продолжительностью первого этапа дражирования на противоположных уровнях.

В работе [234] обоснована необходимость разработки нового способа получения информации о размерах объектов дражирования без остановки процесса наращивания оболочки. Эта информация необходима для автоматического управления частотой вращения рабочего органа при изменении размеров драже. Определены недостатки способа измерения диаметра драже с помощью электромеханических пробоотборников. Выявлено влияние размеров объектов дражирования на величину диэлектрической проницаемости дражируемой массы. В свою очередь, диэлектрическая проницаемость влияет на величину электрической емкости, образующейся между электродами. От электрической емкости зависит емкостное сопротивление, а также величина переменного электрического тока.

Рассмотрены три этапа процесса дражирования. Обоснована целесообразность рассмотрения электрических свойств объектов дражируемой массы на протяжении второго этапа. Установлено, что на втором этапе происходит перераспределение соотношения объемов объектов дражирования, материалов оболочки драже и воздушного пространства между ними. При этом объем и состав дражируемой массы не изменяются. Составлены и проанализированы математические выражения, характеризующие соотношения объемов мате-

риалов оболочки драже, объектов дражирования и воздуха. При теоретическом исследовании процесса наращивания оболочки были сделаны допущения об одновременном увеличении диаметра объектов дражирования и о шарообразной форме образующихся драже. Расчеты производились на примере плоских электродов с размещенной между ними дражируемой массой. При этом предмет исследования рассматривался как электрический конденсатор с переменной диэлектрической проницаемостью среды между его обкладками. Доказано, что диэлектрическая проницаемость среды является функцией от диаметра объектов дражирования, и также зависит от их количества, находящихся между пластинами. Установлено, что с увеличением размеров объектов дражирования диэлектрическая проницаемость дражируемой структуры уменьшается.

В работах [77, 76, 61, 93] выявлены недостатки барабанных дражировщиков, из которых наиболее существенным являются цикличность дражирования, определяющая сложность автоматизации процесса и его включения в технологическую линию комплексной предпосевной обработки семян. Приведено обоснование эффективности использования ленточных дражировщиков, обеспечивающих непрерывность процесса и существенно повышающих его производительность режимов и количественных характеристик обволакивания семян, аналогичных барабанной конструкции, определены основные рабочие параметры ленточного дражировщика: длина, скорость движения и угол наклона ленты транспортера. Полученные математические выражения являются универсальными, поскольку позволяют произвести расчет рабочих параметров дражировщиков при обработке семян сельскохозяйственных растений с различными исходными размерами, массой и триботехническими свойствами [133]. При исследовании перемещения дражируемых семян по движущейся ленте наклонного транспортера были приняты во внимание действующие на них сила трения, сила реакции опоры, скатывающая сила и сила тяжести. Векторные уравнения равновесия сил были представлены в скалярной форме посредством проецирования на оси введенной прямоугольной системы координат. Разность

ускорений, определяющих движение драже, представлена разностью двух тригонометрических функций. В результате поиска нулей исследуемой функции определялись значения углов наклона транспортера, обеспечивающих наибольшую частоту вращения драже. Исходя из аналогии поступательного движения семян по наклонной плоскости их движению по внутренней поверхности барабана бесконечно большого радиуса, были установлены численные значения рабочих параметров процесса дражирования в непрерывном режиме. Сделано заключение о возможности уменьшения габаритов ленточного дражиратора посредством реализации расчетной длины рабочей зоны ленты транспортера суммой длин нескольких лент, расположенных наклонно по отношению к Земле в разных плоскостях.

Результаты исследований были приняты во внимание при разработке ряда конструкций ресурсо-энергоэффективных дражираторов [15, 7, 6, 8, 25, 331, 184, 32, 40, 34, 204].

Выводы.

1. Непрерывный режим дражирования семян сельскохозяйственных растений может быть достигнут на дражираторах с рабочим органом в виде наклонного транспортера. Для обеспечения эффективного дражирования поступательная скорость движения драже в начале процесса должна быть скомпенсирована скоростью движения ленты, а в конце – несколько превышать ее.
2. Параметры дражиратора с рабочим органом в виде наклонного транспортера могут быть найдены по достижению радиусов драже заданного значения. При этом процесс наращивания оболочки рассматривается как совокупность циклов вращательного движения, приводящего к дискретному приращению радиусов драже за время каждого цикла.
3. Длина ленты транспортера составляет треть произведения квадрата длительности дражирования, ускорения поступательного движения дражируемых семян и синуса угла наклона транспортера относительно поверхности Земли.

4. Процесс дражирования сопровождается уменьшением диэлектрической проницаемости среды, заполняющей пространство между плоскими, параллельно расположенными электродами.

5. Зависимость диэлектрической проницаемости дражируемой массы от размеров объектов дражирования может быть использована для получения информации о наращивании оболочки в непрерывном режиме (без остановки процесса).

6. Измерение диэлектрической проницаемости дражируемой массы в производственных условиях может осуществляться по величине переменного электрического тока, протекающего через анализируемую цепь.

6.3 Ресурсо-энергосберегающий способ аккумулирования энергии в системах автономного электроснабжения объектов АПК

При распространении первого уравнения совокупности (2.2) на проблему аккумулирования энергии $k_3 \frac{dz_1}{dt} = 0$. Слагаемое $k_1 \frac{d\varphi_1}{dt}$ иллюстрирует преобразование механической энергии в электрическую, а слагаемое $k_2 \frac{dx}{dt}$ – накопление и отдачу кинетической энергии маховиком. Для достижения сбережения энергетического ресурса следует увеличивать эффективность накопителя посредством снижения трения вала в подшипниках, маховика о воздух (k_4), а также увеличивать частоту вращения маховика $\left(\frac{dx}{dt}\right)$.

Для исключения негативных последствий от непостоянства объема преобразованной энергии в системах автономного энергоснабжения объектов АПК целесообразно использование различных аккумуляторов [239]. При этом преобразованная энергия может аккумулироваться как в натуральном виде, так и в иных формах, с использованием замкнутых или условно замкнутых энергетических систем [47, 192, 49]. В результате анализа современного состояния энергоаккумулирующих средств установлено, что для накопления энергии в автономных гелиосистемах вполне могут быть использованы инерционные аккумуляторы, называемые также маховиками. Производственное использо-

вание маховиков имеет полуторовековую историю [231, 149], однако возможность их применения в системах автономного электропитания появилась лишь в последнее десятилетие.

Уравнение динамики вращения маховика имеет вид:

$$M_{\text{вн}} = I \frac{d\omega}{dt} - M_{\text{тр}}, \quad (6.1)$$

где $M_{\text{вн}}$ – внешний момент (активный при зарядке и тормозящий при разрядке); I – момент инерции маховика; ω – угловая скорость вращения; $M_{\text{тр}}$ – момент трения, являющийся суммой момента аэродинамического трения $M_{\text{м.а.}}$ и момента трения в подшипниках и уплотнениях $M_{\text{м.н.}}$.

В результате умножения слагаемых выражения (6.1) на ωt и последующего интегрирования получим уравнение баланса энергии:

$$\int_{t_1}^{t_2} \omega M_{\text{вн}} dt = \int_{t_1}^{t_2} I \frac{\omega dt d\omega}{dt} - \int_{t_1}^{t_2} M_{\text{тр}} \omega dt$$

$$\frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2} - \int_{t_1}^{t_2} \omega M_{\text{т.а.}} dt - \int_{t_1}^{t_2} \omega M_{\text{м.н.}} dt = \int_{t_1}^{t_2} \omega M_{\text{вн}} dt, \quad (6.2)$$

где ω_1 и ω_2 – начальная и конечная угловые скорости (в моменты времени t_1 и t_2 соответственно).

Из выражения (6.2) видно, что в режиме разрядки кинетическая энергия маховичного накопителя, определяемая выражением $W_{\text{кин}} = 0,5I(\omega_1^2 - \omega_2^2)$, расходуется на полезную отводимую энергию $W = \int_{t_1}^{t_2} \omega M_{\text{вн}} dt$ и на энергию потерь трением $W_{\text{тр}} = \int_{t_1}^{t_2} \omega M_{\text{м.а.}} dt + \int_{t_1}^{t_2} \omega M_{\text{м.н.}} dt$.

Для повышения эффективности маховичных накопителей необходимо обеспечить максимальный уровень начальной кинетической энергии $M_{\text{к1}} = \frac{I\omega_1^2}{2}$ и минимальные потери $W_{\text{тр}}$ с помощью тех или иных технических решений.

Объективным показателем эффективности накопителей энергии любого принципа действия является удельная энергоёмкость: Уд. эн. = $\frac{V}{m}$, где V – объём запасенной энергии, кВт·ч (или МДж); m – масса накопителя энергии, кг. По мере научно-технического прогресса этот показатель постепенно изменяется. Поэтому для сравнения химических и маховичных аккумуляторов значе-

ния этого показателя были проанализированы на интервале в несколько десятилетий [273].

По представленным на рисунке 6.1 зависимостям можно сделать вывод, что уже в середине шестидесятых годов двадцатого столетия удельные энергоёмкости химических и маховичных аккумуляторов практически сравнялись. В последующие годы, (и вплоть до наших дней), эффективность химических накопителей увеличивалась незначительно, войдя в стадию насыщения в наши дни [288]. И, напротив: удельная энергоёмкость маховичных накопителей энергии, начиная с сороковых–пятидесятих годов, постепенно повышалась и в последние годы устремилась вверх. Резкое увеличение энергоёмкости маховичных аккумуляторов объясняется широким распространением магнитных подшипников, расширяющимся использованием особо прочных материалов и положительным опытом применения нанотехнологий для изготовления маховиков.



Рисунок 6.1. – Зависимости удельных энергоёмкостей химических и маховичных накопителей энергии от времени разработки.

Вследствие малосерийного производства стоимость маховичных накопителей пока остается несколько выше стоимости химических аккумуляторов. В то же время срок службы супермаховиков превышает аналогичный показатель химических аккумуляторов в несколько раз.

Инерционные динамические аккумуляторы, выполненные с использованием современных материалов, обладают весьма высокими эксплуатационными

ми свойствами. Среди них следует отметить исключительную продолжительность сохранения накопленной энергии. Например, маховик из борного волокна, раскрученный до частоты порядка $40 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$ и установленный на электромагнитной подвеске в вакуумной камере, в режиме холостого хода будет вращаться в течение нескольких недель. По сравнению с химическими аккумуляторами маховики абсолютно экологичны и допускают произвольные режимы пополнения и выдачи энергии. Поскольку автономные гелиосистемы эксплуатируются в стационарном режиме, масса и габариты супермаховиков особого значения не имеют. Для достижения безопасности и исключения воздействия акустических и вибрационных помех, инерционные динамические аккумуляторы могут быть установлены в подвале или даже в каком-нибудь отдельном сооружении хозяйственного назначения.

В качестве примера использования маховичного накопителя в составе системы автономного электроснабжения с суммарной установленной мощностью электрооборудования 3 кВт и режимом разряда продолжительностью 15 часов рассчитаны основные габаритные размеры стального цилиндрического маховика. Результаты расчета отражены на рисунке 45 приложения В, выполненного с соблюдением масштаба.

Современные средства автоматики в сочетании с комбинированным подключением пассивных и активных маховиков позволяют повысить гибкость управления систем с инерционными накопителями. В работах [56, 191, 194] приведены технические решения по энергосбережению при использовании двухдвигательного электропривода циркулярных пил.

По результатам исследований сделан вывод о перспективности использования инерционных накопителей для аккумуляции энергии в маломощных автономных системах электроснабжения объектов АПК.

6.4 Утилизация кинетической энергии жидких теплоносителей в безнасосных автономных отопительных системах

При рассмотрении утилизации кинетической энергии жидких теплоносителей первое уравнение совокупности (2.3) рассматривается в виде:

$$E(t) = (k_1 \frac{d\varphi_1}{dt} + k_2 \frac{dx_1}{dt} + k_3 \frac{dz_1}{dt})k_5 \cdot \xi_1 + k_4$$

Здесь принимают участие все члены исходной совокупности. Тепловая энергия создает разность температур теплоносителя в разных точках отопительной системы, разность температур определяет разную плотность теплоносителя и его движение по замкнутому контуру, а кинетическая энергия теплоносителя преобразуется в механическую или даже в электрическую форму. Очевидно, что исследовательская деятельность должна быть направлена на разработку способов по увеличению коэффициентов k_1 , k_2 , k_3 и k_5 , при ограничении $E(t)$ по максимуму, определяемым отрицательными последствиями для работоспособности отопительных систем.

Эксплуатация безнасосных автономных отопительных систем (так же, как коллекторных гелиосистем) сопровождается движением теплоносителя, которое может быть обусловлено разностью плотностей жидкости при различных температурах. В системах с применением воды прогретый теплоноситель имеет меньшую плотность, чем охлажденный, вследствие чего вода с выхода котла или солнечного коллектора поднимается вверх, проходит через теплообменники потребителей и, остывая, постепенно опускается вниз. Поскольку отопительная система является замкнутой, в ней происходит непрерывное естественное движение теплоносителя по внешнему контуру от выхода котла к его входу. При этом максимальную температуру теплоноситель имеет на выходе котла (обычно $55^\circ \dots 65^\circ\text{C}$), а минимальную – на входе ($35^\circ \dots 45^\circ\text{C}$).

Скорость естественного течения жидкости в таких системах весьма небольшая, однако это не мешает часть кинетической энергии теплоносителя преобразовать в механическую энергию, а затем – даже в электрическую [319, 329]. Механическая энергия может быть использована для обслуживания соб-

ственных нужд гелиосистемы (поворота коллекторов вслед за Солнцем, управления смесительными кранами и т.д.), а электрическая – для питания измерительной аппаратуры, процессоров и небольших исполнительных механизмов [199]. Эта мера позволяет достичь полной автономности гелиосистем, исключить их зависимость от внешнего электроснабжения или от использования химических источников электрической энергии [216]. В результате гидравлического расчета была произведена оценка энергетической эффективности такого преобразования. При этом принималось допущение, что жидкость в гелиосистеме совершает движение по замкнутому трубопроводу, имеющему форму тора (см. рисунок 6.2). Такое допущение позволяет пренебречь локализованными потерями давления в трубопроводе и принять, что эти потери равномерно распределены по всему пути движения жидкости, представляющему собой окружность с радиусом R . Установлено, что механическая энергия будет определяться диаметром трубопровода, расстоянием между точками нагрева и охлаждения жидкости по высоте, зависимостью плотности жидкости от температуры, ее вязкостью, величиной разности температур, а также различными сопротивлениями движению потока.

Зависимость преобразованной мощности от диаметра труб и высоты подъема воды хорошо видна на графике, представленном на рисунке 46 приложения В. Увеличение высоты подъема нагретой жидкости, во-первых, имеет чисто физический предел, а, во-вторых, далеко не всегда возможно на практике, так как этому препятствуют архитектурные требования.

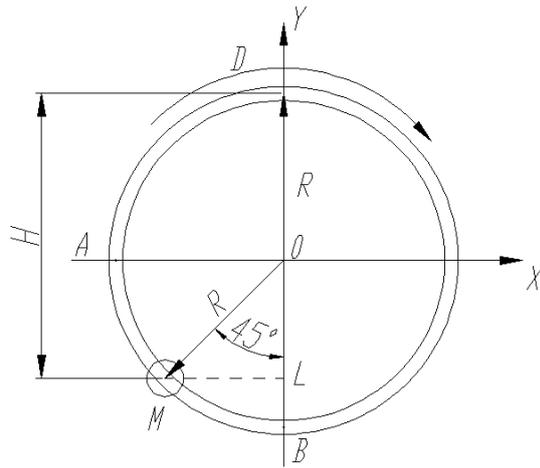


Рисунок 6.2 – Схема движения воды по замкнутому трубопроводу под влиянием разности температур.

Увеличение утилизируемой мощности за счет увеличения диаметра или количества труб также не всегда эффективно, так как главной целью гелиосистемы остается получение теплоты, а исходными данными при ее проектировании являются теплотехнические характеристики. Кроме того, эта мера увеличит габариты, массу и стоимость установки, что не всегда допустимо. Из перечисленных мер остается повышение разности плотностей теплоносителя, которая формируется в рабочем диапазоне температур. Зависимость этой величины от температуры определяется свойствами теплоносителя, поэтому в нашем случае правильность его выбора приобретает особое значение.

Принимая во внимание эту зависимость, а также другие особенности эксплуатации гелиосистем, основные требования к теплоносителю сводятся к максимальной разности плотностей на границах интервала рабочих температур; низкой вязкости; постоянству фазового состояния в рабочем диапазоне температур; отсутствию агрессивных свойств по отношению к материалу крыльчатки и труб; экологической безопасности, безвредности по отношению к персоналу, взрыво-пожаробезопасности; доступности, низкой стоимости, возможности длительного использования без изменения вышеперечисленных свойств.

Кроме того, не следует забывать, что рассматриваемая жидкость прежде всего является теплоносителем, вследствие чего у она должна обладать достаточно высокой теплоемкостью. Рассмотрим ряд жидкостей, не уступающих воде по первому из сформулированных требований [345]. Поскольку при эксплуатации гелиосистем возможен выход температуры теплоносителя за границы принятого в качестве примера рабочего диапазона, ограничим перечень рассматриваемых жидкостей только такими, у которых температура кипения превышает 80°C . Кроме того, для удовлетворения требования по текучести будем анализировать жидкости, у которых динамический коэффициент вязкости не превышает значения, свойственного воде, более чем на 20%. Оценку эффективности использования жидкостей произведем по величинам мощности. Результаты сопоставления жидкостей, оказавшихся эффективнее воды, помещены в таблицу 46 приложения А.

Не все из включенных в таблицу 46 приложения А жидкостей удовлетворяют поставленным требованиям. Например, у этилацетата и тетрахлорметана температура кипения немного не достигает 80°C , а у тетрахлорметана и трихлорэтана динамический коэффициент вязкости превышает значение этого показателя для воды более чем на 20%. В то же время использование трихлорэтана или тетрахлорметана представляется весьма заманчивым вследствие относительно высоких значений преобразованных мощностей (в 2,5 и 3 раза соответственно). Принимая во внимание низкую температуру кипения тетрахлорметана можно сделать вывод о целесообразности его использования в качестве теплоносителя в низкотемпературных гелиосистемах. Аналогично трихлорэтан целесообразно применять в системах с небольшой протяженностью трубопроводов, содержащих минимум местных сопротивлений.

Все рассмотренные жидкости уступают воде по теплоемкости. Например, если массовая теплоемкость воды составляет $4,19 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град.}$, то у тетрахлорметана в рабочем диапазоне температур она не превышает $0,88 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град.}$, а у трихлорэтана – $1,17 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град.}$ В ряду рассмотренных жидкостей максимальную теплоемкость имеет этилацетат ($2,05 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град.}$),

но и в этом случае рабочая поверхность теплообменных аппаратов должна быть примерно в два раза больше, чем при использовании воды.

Главным недостатком всех рассмотренных жидкостей (кроме воды!) является высокая токсичность. И только бензол, хлорбензол и этилацетат не требуют принятия особых мер безопасности. В то же время тетрахлорметан и трихлорэтан относятся к сильно ядовитым веществам, проявляющими явные канцерогенные и наркотические свойства.

Помимо жидкостей, вошедших в табл.46 приложения А, интерес представляют такие распространенные и весьма доступные вещества как этиловый спирт и гликоли. Однако низкая температура кипения этилового спирта ($78,3^{\circ}\text{C}$) существенно ограничивает возможность его применения в качестве теплоносителя. В гелиосистемах могут найти применение гликоли. Среди них наибольшее распространение получили этиленгликоль и пропиленгликоль. Теплоемкость этиленгликоля близка к теплоемкости воды, однако разность плотностей этого вещества на границах температурного диапазона невелика, что не позволяет преобразовать мощность более 2,9 Вт. В отличие от этилового спирта этиленгликоль весьма токсичен, что создает дополнительные неудобства при эксплуатации гелиосистем.

Пропиленгликоль в 25%-й концентрации при температурах 40°C и 60°C характеризуется плотностью 1420 кг/куб.м и 903 кг/куб.м соответственно. Имея теплоемкость 4.0 кДж/кг·град., пропиленгликоль обеспечивает в тех же условиях преобразование 3,8 Вт. Это вещество практически безопасно, однако стоимость его в 2,5 раза превышает стоимость распространенного этиленгликоля.

Таким образом, выбор теплоносителя во многом определяется назначением и особенностями гелиосистемы. Следуя описанной последовательности рассуждений можно достаточно оперативно оценивать количественные показатели утилизации кинетической энергии теплоносителей и создать условия для ее эффективности.

Преобразование кинетической энергии теплоносителей предложено использовать в энергосберегающем устройстве для подъема воды в составе автономных отопительных систем [319, 217].

6.5 Ресурсосберегающий электротехнологический способ борьбы с варроатозом пчел

При обращении ко второму уравнению совокупности (2.1) с точки зрения выявления направлений исследований для разработки способов борьбы с варроатозом пчел становится очевидным присутствие всех слагаемых в исходно записи его правой части. Здесь содержатся: электрическая составляющая, как фактор первичного воздействия низкочастотного поля на пчел, механическая составляющая, характеризующая повышение их двигательной активности, и тепловая составляющая, определяющая селективное воздействие СВЧ-поля на клещей. В этом же уравнении присутствует слагаемое, предусматривающее материальные потери. Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности проведения последующих исследований, направлены на повышение эффективности всех перечисленных преобразований (определяемых коэффициентами k_1 , k_2 , k_3 и k_5 и энергетическим коэффициентом ξ_2), а также на снижение k_6 .

При разработке ресурсосберегающего способа борьбы с варроатозом были использованы сведения о возбуждающем действии электрического поля частотой 450...550 Гц на пчел и выделении ими торбиона, воздействующего на остальных особей пчелосемьи и приводящего ее в возбужденное состояние. В результате возбуждения температура внутри улья возрастает, что определяет осыпание клещей. Второе используемое явление заключается в селективном действии сверхвысокочастотных электрических полей на объекты различных геометрических размеров.

Предложенный способ борьбы с варроатозом пчел заключается в воздействии на пораженную пчелосемью электрической энергией, в качестве которой используется амплитудно-модулированное электрическое поле с низкочастотной

(от 450 до 550 Гц) и высокочастотной от (22,7 до 25,5 гГц) составляющими при глубине модуляции 50...80%. В процессе обработки напряженность электрического поля амплитудно-модулированного сигнала составляет 200 В/см, а продолжительность воздействия на пчёл – 15 минут [341, 112].

Из радиобиологии известна зависимость интенсивности воздействия высокочастотной энергии на диэлектрические объекты от их геометрических размеров [280]. Указанная зависимость иллюстрируется графиком, представленным на рисунке 6.3. График отражает функцию эффективной поглощающей поверхности сферы S (со свойствами биологического объекта) от величины отношения удвоенного произведения ее радиуса r и числа π (что по существу является длиной окружности этой сферы, обозначаемой в дальнейшем символом L) к длине волны λ излучения. Из графика видно, что эффективная поглощающая поверхность S , а, следовательно, и величина поглощенной при прочих равных условиях энергии существенно зависит от отношения величины L к величине λ . Очевидно, что при одинаковой интенсивности облучения и длине волны сферические тела различных радиусов будут отличаться по величине удельного поглощения.

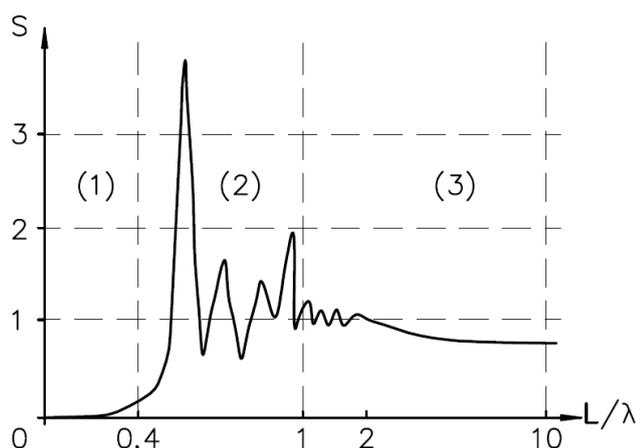


Рисунок 6.3 – Зависимость эффективной поглощающей поверхности сферы от геометрических размеров облучаемого объекта и длины волны.

На рассматриваемом графике $S = f\left(\frac{r}{\lambda}\right)$ можно выделить три характерные области [213]:

- 1) область (1) малых величин $\frac{r}{\lambda}L$ и S ;
- 2) область (2) промежуточных значений $\frac{r}{\lambda}L$, где S имеет значительные колебания;
- 3) область (3) больших значений $\frac{r}{\lambda}L$, при которых S стремится к некоторому постоянному пределу.

Область (1), определяемая границей $r < 0,05\lambda$, характеризуется слабым взаимодействием волны с облучаемыми объектами. В области (2) взаимодействие волны с биообъектом в существенной степени зависит от геометрических размеров последнего. В этом случае даже небольшие колебания размеров биообъекта могут значительно повлиять на количество поглощенной им энергии. Наконец, в области (3), при $r \geq 0,3\lambda$ удельное поглощение энергии ввиду асимптотического поведения S монотонно убывает.

По рассмотренной зависимости определена длина волны (и соответственно – частота) высокочастотной составляющей электрического поля, соответствующей максимальному поглощению энергии клещами и не оказывающей заметного влияния на пчел [72].

Известно, что геометрические размеры тел клещей составляют примерно 1,00 x 1,7 x 1,6 мм, а средние размеры тел рабочих пчел, образующих основную часть пчелиной семьи – 13,0 x 4,20 x 4,30 мм. Допуская сферообразные формы тел пчел и клещей, величины радиусов эквивалентных сфер будут $r_1 = 6$ мм (для пчел) и $r_2 = 1,2$ мм (для клещей). Эффективная поглощаемая поверхность клеща максимальна (на участке 2) и соответствует значению 3,5 (в относительных единицах). Последнему будет соответствовать значение абсциссы – 0,568. Из соотношения $\frac{2\pi r_1}{\lambda} = 0,568$ можно определить длину волны: $\lambda = 1,32$ см (или частоту $f = 22,72$ Гц). При этой длине волны абсцисса $\frac{2\pi r_2}{\lambda}$ для пчелы составит величину 2,84. Тогда по графику делается вывод, что тело пчелы сможет поглотить энергию, соответствующую только 0,94 относитель-

ным единицам, что будет меньше энергии, поглощенной телом клеща в 3,7 раза.

На участке (2), при значении абсциссы, равном 0,7, рассматриваемая кривая $S = f\left(\frac{r}{\lambda}\right)$ свою монотонность утрачивает, На участке (3), а также правее значения абсциссы, равном 0,7, на участке (2) возможно проявление обратного эффекта, то есть повышенное поглощение энергии телом пчелы. Поэтому, при принятых радиусах эквивалентных сфер пчелы и клеща использование высокочастотного электрического поля целесообразно на частотах от 22727 МГц (22,7 ГГц) до 25500 МГц (25,5 ГГц).

Вместе с тем известно, что селективность поглощения энергии поля в зависимости от геометрических размеров биологических объектов в основном распространяется на объекты, находящиеся в свободном (взвешенном) состоянии. На практике же, клещи Варроа, как правило, прочно закрепляются на телах пчел и селективность поглощения энергии поля определяется исключительно за счет образования своеобразных выпуклостей. Гораздо большая селективность воздействия наблюдается хотя бы при кратковременном отделении клеща от тела пчелы. Поэтому, для эффективного отделения клещей предложено использовать и низкочастотную составляющую амплитудно-модулированного сигнала электрического поля, вызывающую существенное повышение двигательной активности пчел. При этом происходит массовое осыпание клещей, так как известно, что повышение двигательной активности пчел вызывает их стряхивание [266, 267]. Воздействие низкочастотной составляющей электрического поля амплитудно-модулированной энергией частотой 450...550 Гц вызывает быстрое повышение двигательной активности пчел, в то время как последующее уничтожение клещей достигается влиянием высокочастотной составляющей. Экспериментально установлено отсутствие отрицательных последствий при воздействии на пчел энергией электрического поля в течение 10...15 минут. При многократном повторении обработки эффект привыкания не наблюдался.

Описанный способ может быть использован для борьбы с другими клещевыми болезнями пчел.

6.6 Векторы развития ресурсо-энергосберегающих электротехнологий в АПК

Помимо вышеописанных электротехнологических способов и технических средств ресурсо-энергосбережения в производственных процессах АПК объектом дальнейших исследований может послужить ряд направлений, сумма знаний по которым свидетельствует о их перспективности при условии последующих углубленных исследований и приобретении опыта практического использования в производстве. Эти направления непосредственным образом связаны с исследованиями, нашедшими отражение в настоящей работе, и в разной степени проработки определили достижение поставленной цели.

К числу перспективных векторов развития ресурсо-энергосберегающих технологий относится использование термоэлектрических элементов для решения теплотехнических задач. Несмотря на относительно низкий КПД современных термоэлектрических преобразователей они вполне могут быть использованы в системах утилизации тепловой энергии [113, 129], а также в установках для преобразования энергии возобновляемых источников с целью повышения их эффективности [315]. Кроме того, термоэлектрические элементы могут обеспечивать электрической энергией собственные нужды автономных теплогенераторов и других устройств [327].

В работах [50, 188, 31, 161, 236, 325] приведены результаты исследований, направленных на повышение энергетической эффективности термоэлектрических преобразователей, которые могут быть успешно использованы в автономных системах отопления и горячего водоснабжения [397, 323], а также в установках для сушки древесины и других материалов [324, 332]. В этих случаях термоэлектрические элементы работают в режиме тепловых насосов, обеспечивая рекуперацию тепловой энергии от удаляемого в атмосферу влажного воздуха из камеры сушки или участвуя в двухстадийной сушке при одно-

временном нагреве и охлаждении различных партий сушимого материала [168, 335].

Новые возможности в снижении энергетических затрат открываются благодаря существенному уменьшению стоимости управляющего электрооборудования на основе микропроцессорных устройств, а также использованию современных конструкционных материалов [242].. В работах [114, 90, 162, 158, 142, 156, 171, 42, 227, 338] приведены результаты исследований по совершенствованию теплотехнического оборудования, установок для производства технического углерода, равномерного получения биогаза и энергосберегающей пастеризации молока.

Большие перспективы открываются по мере накопления знаний в области взаимодействия электрических полей и процесса горения. Уже сегодня электрические поля с разными параметрами предлагается использовать для управления горением газа в водогрейных котлах малой мощности [314], а также для угнетения горения в пиролизных котлах, обеспечивая низкую скорость окислительных реакций без ограничения доступа кислорода и не допуская образования окиси углерода [308].

В области ветроэнергетики просматриваются перспективы разработки ресурсосберегающих установок для прямого преобразования кинетической энергии движущихся воздушных масс в электрическую форму. В этом направлении можно выделить исследования по получению электрической энергии за счет электризации твердых тел в газовых потоках [71, 99, 145, 235], а также использованию электрогидродинамического эффекта [78, 205]. Кроме того, в работах [168, 335] приводятся сведения о возможности использования зависимости воздушной проницаемости решетчатых поверхностей от ионизации набегающего воздушного потока для разработки ветродуигателей с электроуправляемыми лопастями.

К решению проблемы ресурсосбережения относятся исследования по частичной замене реактивных элементов электронных схем на полупроводниковые аналоги [68, 193, 91, 174, 55]. Традиционное использование конденсаторов

и катушек индуктивностей связано с расходом слюды и цветных металлов. Кроме того, габариты этих элементов при заданных параметрах не всегда могут быть минимизированы. В то же время современный уровень развития технологии изготовления микросхем позволяет реализовать физические явления, происходящие в реактивных элементах, несложными схемными решениями на основе полупроводниковых микросборок.

Уменьшение доли монотонного ручного труда на этапе сортировки и фасовки сельскохозяйственной продукции может быть достигнуто посредством использования роботизированных манипуляторов и оптико-электронных устройств [69, 177, 138, 147, 10, 11, 12, 18, 17, 185, 41, 104, 70, 176, 178]. Несмотря на разнообразие этих видов технических средств совершенствование управляющих алгоритмов существенным образом повышает производительность технологических процессов и улучшает условия труда [136, 20].

Существенные резервы экономии водных ресурсов заключаются в экономии воды при мойке и обслуживании сельскохозяйственных машин. В работе [172] приведен алгоритм ресурсосберегающего управления насосными агрегатами при мойке крупногабаритной техники.

6.7 Производственная проверка и оценка экономической эффективности электротехнологических способов и технических средств ресурсоэнергосбережения в АПК

Результаты научных исследований, отраженные в настоящей работе, в различной степени готовности были внедрены на ряде производственных и учебном предприятии РФ:

1. система автономного обогрева помещений; и автономная отопительная система – при проектировании системы обогрева теннисного корта «Компанией СвязьИнТех» (документ 1 приложения Г);
2. устройство для измерения количества потребленной жидкости и беспроводное устройство для контроля влажности почвы – обществом с

- ограниченной ответственностью «ЭнергоСтандарт» (документ 2 приложения Г);
3. средства двухмерного моделирования течения жидкости через трубопроводу с препятствием – ФГБОУ ВО Тверская ТГСХА (документ 3 приложения Г);
 4. результаты экспериментально-теоретических исследований воздействия озона на горение природного газа – ООО «ТехноПромСервис» (документ 4 приложения Г).

Анализ эффективности предложенных ресурсоэнергосберегающих технологий и технических средств для их осуществления показал, что положительные результаты от их использования определяется совокупностью экономических, социальных и экологических факторов. При этом доминирующая роль фактора зависит от условий производства на объектах АПК и их специфики, а также от масштабов использования предметов исследования. Положительный социальный эффект при использовании автономных отопительных систем обусловлен снижением зависимости конечных потребителей от ресурсоэнергоснабжающих организаций, уменьшением площади изымаемых земель на сооружение теплотрасс на 25...38% и повышением качества управления температурой. Экономический эффект обусловлен исключением потерь теплоты при ее транспортировке. Применение осциллирующего режима работы грунтовых теплообменников в теплонасосных отопительных системах уменьшает тепловую нагрузку на верхние слои грунта и предотвращает его промерзание в зимнее время. Использование предложенного способа осаждения пыли в отопительных системах с обогреваемыми полами предотвращает заболевания органов дыхания и расширяет функциональные возможности помещений. Использование озонирования топочных камер в газовых водогрейных котлах определяет снижение потребления газа на 15...20% и снижает содержание вредных веществ в продуктах сгорания на 30%. Использование автоматизированной системы коммерческого учета водопотребления позволяет снизить потери воды из-за протечек и несанкционированного отбора на 30%, а также

спланировать экономичный режим водопотребления. Внедрение предложенного комбинированного способа управления поливом обеспечивает снижение водопотребления на 15...20 %. Применение методики определения объема эквивалентного пространства в рабочих камерах микроволновых установок позволяет обеспечивать равномерность обработки сельскохозяйственных материалов и снизить потери на 40%. Использование предложенных способов и технических средств автоматического выключения микроволновых установок при возникновении аварийных режимов обеспечивает снижение затрат на ремонт в среднем на 60% на одну установку в год и позволит исключить вынужденные простои оборудования вследствие необходимости замены магнетронов. Использование силовых ветроэнергетических установок обеспечивает возможность преобразования ветрового ресурса начиная со скорости ветра 1,5...2,0 м/с, что позволяет течение года дополнительно увеличить получение электроэнергии по сравнению с ветродвигателями на скоростных свойствах потока на 10...12%. Применение дражирования семян овощных культур перед посевом диатомитно-песочными и глиняно-песочными смесями позволяет снизить расход семенного материала на 60%, использовать сеялки точного высева и исключить затраты ручного труда на прореживание растений при отсутствии ущерба окружающей среде. Использование дражирователя с ленточным рабочим органом существенно улучшает условия труда вследствие непрерывности процесса, повышает производительность труда на 30...40% и открывает возможность включения дражирования в технологическую линию предпосевной обработки семян.

Оценка экономической эффективности для всех рассмотренных мер ресурсо-энергосбережения производилась, в основном, по сходной методике. В качестве примера рассмотрим схему оценки экономической эффективности газового водогрейного котла «Микро 50», серийно выпускаемого ООО «Термофор» и рассматриваемого в качестве базового варианта. При этом за проектный вариант был принят тот же котел, оснащенный устройством подачи озono-воздушнoй смеси в топочную камеру. Мощность котла при потреблении газа 3 куб.м/ч достигала 50 кВт. Розничная цена на газ на момент расчета

составляла 53,5 руб/ куб.м. Стоимости дополнительного оборудования для оснащения котла сведена в таблицу 47 приложения А. Затраты на доставку монтаж и наладку, ($Ст_{доп}$) дополнительного оборудования приняты в размере 50% от их стоимости. Обозначив показатели базового варианта индексом «1», а проектного – индексом «2», определим капитальные затраты: $K_1 = 53.500$ руб., $K_2 = 66.565$ руб.

При уменьшении расхода природного газа на 20% за счет озono-воздушного наддува часовое потребление топлива сократилось до 2,4 куб м. Годовые амортизационные отчисления принимались равными 18%, а затраты на текущий ремонт – 14% от стоимости капитальных затрат.

Эксплуатационные издержки (\mathcal{E}) складываются из расходов на амортизацию, текущее обслуживание, оплату природного газа и прочих неучтенных составляющих: $\mathcal{E}_1 = 89.898$ руб., $\mathcal{E}_2 = 80.364$ руб.

Тогда условно-годовая экономия определится как $\mathcal{E}_{y.g.} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2$, а срок окупаемости капитальных затрат: $T_{ок.} = \frac{\Delta K}{\mathcal{E}_{y.g.}} = \frac{(K_2 - K_1)}{\mathcal{E}_{y.g.}}$. После подстановки численных значений получим: $\mathcal{E}_{y.g.} = 9534$ руб., $T_{ок.} = 1,37$ год.

Годовой экономический эффект от применения озono-воздушного наддува:

$$\mathcal{E}_э = \mathcal{E}_{y.g.} - E_n \times \Delta K,$$

где E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных затрат. При $E_n = 0,15$ (в условиях топливно-энергетической отрасли), $\mathcal{E}_э = 7574,25$ руб.

Величина дисконтируемого дохода иллюстрируется данными таблицы 48 приложения А. Из таблицы 48 приложения А следует, что в абсолютных единицах срок окупаемости проектного варианта составляет шага (два года), и срок окупаемости с учетом дисконтирования будет равен двум годам. При этом чистый доход проекта через пять лет составит 35105. Чистый дисконтированный доход проекта равен дисконтированному потоку нарастающим итогом на 5-м шаге, т.е. 14881 денежных единиц.

Выводы по главе 6:

1. Ресурсосберегающее осушение воздуха на объектах АПК может быть реализовано с помощью поглощения влаги адсорбентом в виде силикагеля при последующей его регенерации без нагрева в озono-воздушной среде при концентрации озона от 10...15 мг/м³.
2. Информации о размерах драже в процессе дражирования семян может быть получена без остановки процесса по величине диэлектрической проницаемости дражируемой среды.
3. Измерение диэлектрической проницаемости дражируемой массы в производственных условиях может осуществляться по величине переменного электрического тока, протекающего через анализируемую цепь.
4. Непрерывный режим дражирования семян сельскохозяйственных растений может быть достигнут на дражираторах с рабочим органом в виде наклонного транспортера. Для обеспечения эффективного дражирования поступательная скорость движения драже в начале процесса должна быть скомпенсирована скоростью движения ленты, а в конце – несколько превышать ее.
5. Для эффективного аккумуляирования электрической энергии в составе автономной стационарной системы энергообеспечения целесообразно использование инерционных накопителей.
6. При эксплуатации безнасосных коллекторных гелиосистем часть кинетической энергии движения теплоносителя может быть преобразована в электрическую форму. При этом в качестве теплоносителя целесообразно использовать воду, тетрахлометил или этиленгликоль.
7. Ресурсосберегающий способ борьбы с варроатозом пчел заключается в воздействии на пораженную пчелосемью электрической энергией, в качестве которой используется амплитудно-модулированное электрическое поле с низкочастотной (от 450 до 550 Гц) и высокочастотной от (22,7 до 25,5 ГГц) составляющими при глубине

модуляции 50...80%. В процессе обработки напряженность электрического поля амплитудно-модулированного сигнала составляет 200 В/см, а продолжительность воздействия на пчёл – 15 минут .

Заключение

1. В результате анализа современных научных концепций по проблеме эффективного использования материальных и энергетических ресурсов установлена их методологическая разобщенность, ограничивающая возможность обоснования новых способов и технических средств энерго-ресурсосбережения в технологических процессах АПК. Разработаны научно-методологические основы энерго-ресурсосбережения, позволяющие создавать новые способы сокращения потребления материальных и энергетических ресурсов и заключающиеся в формализации и последующем анализе разнотипных материально-энергетических преобразований в соответствии с законом сохранения и взаимного обращения массы и энергии с учетом зависимости эффективности этих преобразований от произведения плотности потока рассматриваемых субстанций и скорости их распространения в упругой среде. Обоснован способ оценки эффективности разнотипных материально-энергетических преобразований с учетом стереометрических показателей преобразователей.

2. На основе положения о целесообразности повышения эффективности энергетических и материальных преобразований посредством увеличения их скорости обоснован способ осциллирующего подключения грунтовых теплообменников в электрифицированных системах отопления с применением тепловых насосов, исключающий отрицательные экологические последствия и обеспечивающий увеличение поступления тепловой энергии на 18...25%. Разработаны комплекты электрооборудования для реализации осциллирующего режима и методика расчета их рабочих параметров. Обоснован способ снижения потребления природного газа в водогрейных котлах малой мощности на 15...20% при одновременном уменьшении содержания окислов углерода и азота в продуктах сгорания на 30% посредством ускорения окислительного процесса в топочных камерах за счет подачи в зону горения озono-воздушной смеси с концентрацией $90...200 \text{ мг/м}^3$. Разработаны способ и электрифицированные технические средства для коммерческого учета водопотребления, позволяющие сократить потери воды из-за протечек и несанкционированного отбо-

ра на 32...35 %, а также спланировать экономичный режим расхода водных ресурсов. Обоснован комбинированный способ управления поливом, основанный на формировании управляющего воздействия по отклонению влажности почвы, по возмущающим факторам и по прогнозу выпадения осадков, обеспечивающий снижение водопотребления на 12...18 %.

3. Используя положение о зависимости эффективности энергетических воздействий на материальные объекты с целью придания им заданных свойств от плотности энергетического потока и энергетических потерь установлена аналитическая зависимость между точностью дозирования СВЧ-воздействия на сельскохозяйственные материалы и эквивалентным объемом в рабочих камерах микроволнового оборудования. Найденная зависимость позволяет сократить потери некачественно обработанного сырья на 10...15% и неоправданные энергетические затраты на 22...26%. Для стабилизации режима работы СВЧ-генератора при меняющейся массе обрабатываемых материалов с целью сокращения затрат энергии на 15...18% и материальных ресурсов на 30...35% предложен способ автоматического управления напряжением в цепи питания магнетрона в соответствии с разработанным алгоритмом. Выявлены физические факторы, сопровождающие аварийные режимы работы микроволнового электрооборудования. Обоснованы зависимости формы кривой тока в цепи анодного питания магнетрона, а также уровня низкочастотного фона от наличия нагрузки в рабочей камере. На основе исследованных зависимостей разработаны устройства автоматического распознавания аварийных режимов, исключающие выход из строя магнетронов, стоимость замены которых составляет 25...40% от стоимости микроволновых установок.

4. В соответствии с положением о зависимости эффективности энергетических преобразований от стереометрических показателей преобразователей разработана методика расчета элементов конструкции и рабочих параметров, многолопастных ветродвигателей в составе ветроэлектростанций, использующих силовые свойства ветра, открывающая возможность проектирования ресурсосберегающих преобразователей кинетической энергии воздушного пото-

ка в механическую форму с повышенным пусковым моментом. Для обеспечения работоспособности ветроустановок при скоростях ветра от 2,0 м/с разработан ряд силовых конструкций с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей. Разработана методика определения минимально допустимого межосевого расстояния двухосевых ветродвигателей, определяющая уменьшение рабочего пространства конструкции на 40%.

5. Обоснованы перспективные направления разработки новых электротехнологических способов и технических средств энерго-ресурсосбережения в технологических процессах АПК, в частности:

1) энергосберегающий электротехнологический способ осушения воздуха, определяющий снижение энергетических затрат по сравнению с традиционным адсорбционным осушением на 20...25 %;

2) ресурсосберегающий способ дражирования семян в непрерывном режиме, обеспечивающий снижение выхода некачественных драже на 15% и позволяющий встраивать процесс наращивания оболочки в технологические линии подготовки семян к посеву;

3) способ использования инерционных накопителей энергии в системах автономного энергообеспечения стационарных объектов АПК, определяющий увеличение срока эксплуатации аккумулирующего оборудования на 80%;

4) способ утилизации кинетической энергии теплоносителя в автономных безнасосных отопительных системах, исключая зависимость их работоспособности от внешних источников электрической энергии;

5) ресурсосберегающий способ борьбы с варроатозом пчел с использованием амплитудно-модулированного электрического поля, обеспечивающий повышение выживаемости пораженных пчелосемей на 25-30%.

Список литературы

1. Andreev Sergey, Zaginaylov Vladimir, Matveev Andris Energy-saving management. MATEC Web of Conferences Volume 245 (2018) International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018). 06014. Saint-Petersburg, Russia, November 19-20, 2018. Published online: 05 December 2018.– 6 p.
2. Bennert, Wulf: Windenergie / Wulf Bennert //; Ulf-Jurgen Werner. – 2 Aufl. – Berlin: Verl.Technik, 1991.– 144 p.
3. Lim C.Y., Shu, C., Niu, X.D., Chew, Y.T. Application of lattice Boltzmann method to simulate microchannel flows/C.Y. Lim, C. Shu, X.D. Niu, Y.T. Chew // Physics of Fluids. 2002.
№ 4310650/30–15; заявл. 28.09.1987; опубл. 30.04.1989. Бюл. № 16 / Пипко А.И., Прокудин А.С., Юрков В.С., Буров А.С., Андержанов А.Л., Андреев С.А., Шарков Г.А.
4. S. A. Andreev, N. E. Kabdin and V. F. Storchevoy Comparative assessment of the effectiveness of different types of renewable energy sources/ ite as: AIP Conference Proceedings 2661, 120001 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0110154> Published Online: 03 October 2022. – 7 p.
5. Sukop M.C., Thorne, D.T. Lattice Boltzmann modeling: an introduction for geoscientists and engineers. / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.— 172 p.
6. А. с. № 1690579 СССР МКИ А 01 С 1/06. Способ дражирования семян и устройство для его осуществления: № 4717344/15; заявл. 11.07.1989; опубл. 15.11.1991. Бюл.№ 42 / Андреев С.А., Андержанов А.Л., Белоусов Э.В., Пивоваров Д.Н.
7. А.с № 1628881 СССР МКИ А 01 С 1/06. Устройство для дражирования семян: № 4663530/15; заявл. 20.03.1989; опубл. 23.02.1991. Бюл. № 7 / Бородин И.Ф., Андреев С.А., Андержанов А.Л., Пивоваров Д.Н.

8. А.с. № 1209057 СССР МКИ А 01 С 1/00. Устройство для подготовки семян к посеву: № 3766031/30–15; заявл.04.07.1984; опубл. 07.02.1986. Бюл. № 5 / Шарков Г.А., Андреев С.А.
9. А.с. № 1232157 СССР МКИ А 01 С 1/00. Установка для СВЧ-обработки: № 3828665/30–15; заявл. 05.11.1984; опубл. 23.05.1986. Бюл. № 19 / Бородин И.Ф., Шарков Г.А., Андреев С.А.
10. А.с. № 1319934 СССР МКИ G 01 N 29/04. Устройство для сортировки предметов по группам: № 4023086/30-12; заявл. 13.02.1987; опубл. 30.06.1987. Бюл.№ 24 / Андержанов А.Л., Ковалев С.И., Андреев С.А., Тишаков А.А.
11. А.с. № 1357321 СССР МКИ В 05 G 47/46. Устройство для автоматического адресования объекта по кратчайшему пути: № 4021728/27-03; заявл. 13.02.1986; опубл. 07.12.1987. Бюл. № 45 / Андержанов А.Л., Андреев С.А., Ковалев С.И., Тишаков А.А.
12. А.с. № 1395393 СССР МКИ В 07 С 5/342. Устройство для сортировки штучных предметов: № 4113465/30–13; заявл. 22.08.1986; опубл. 15.05.1988. Бюл. № 18 / Андержанов А.Л., Андреев С.А., Ковалев С.И., Каюмов К.М., Шарков Г.А.
13. А.с. № 1453626 СССР МКИ Н 05 В 6/64. Устройство для управления СВЧ-нагревом: № 4192679/24–09; заявл. 11.02.1987; опубл. 23.01.1989. Бюл.№ 3 / Шарков Г.А., Андреев С.А., Андержанов А.Л., Пипко А.И.
14. А.с. № 1459620 СССР МКИ А 01 С 1/00. Установка для СВЧ-обработки: № 4221970/30–15; заявл. 06.04.1987; опубл. 23.02.1989. Бюл. № 7 / Андреев С.А., Андержанов А.Л., Буров А.С., Пипко А.И.
15. А.с. № 1468443 СССР МКИ А 01 С 1/00. Устройство для дражирования семян: № 4229482/30–15; заявл. 13.03.1987; опубл. 30.03.1989. Бюл. № 12 / Бородин И.Ф., Андреев С.А., Ковалев С.И., Андержанов А.Л., Пивоваров Д.Н., Шарков Г.А.
16. А.с. № 1475509 СССР МКИ А 01 С 1/00. Установка для СВЧ-обработки:

- № 4310650/30–15: заявл. 28.09.1987: опубл. 30.04.1989 / Пипко А.И., Прокудин А.С., Юрков В.С., Буров А.С., Андержанов А.Л., Андреев С.А., Шарков Г.А.
17. А.с. № 1496839 СССР МКИ А 01 С 5/342. Устройство для оптической сортировки плодов: № 4266928/30–13; заявл. 22.06.1987; опубл. 30.07.1989. Бюл.28 / Андержанов А.Л., Андреев С.А., Каюмов К.М., Ковалев С.И.
18. А.с. № 1561863 СССР МКИ А 01 G 7/16. Устройство для поштучной подачи округлых предметов: № 4453317/30–15; заявл. 30.06.1988; опубл. 07.05.1990. Бюл.№ 17 / Андержанов А.Л., Андреев С.А., Ковалев С.И., Филаткин В.П.
19. А.с. № 1596493 СССР МКИ Н 05 В 6/64. Устройство СВЧ-обработки: № 4441128/24 –09; заявл. 10.05.1988; опубл. 30.09.1990. Бюл. № 36 / Бородин И.Ф., Андреев С.А., Андержанов А.Л., Соколов А.И., Семенов Л.А., Пипко А.И., Прокудин А.С., Юрков В.С.
20. А.с. № 1666231 СССР МКИ В 07 С 5/342, А 23 N 15/00. Устройство для сортировки штучных предметов: № 4674652/13; заявл. 06.04.1989; опубл. 30.07.1991. Бюл. № 28 / Андержанов А.Л., Андреев С.А., Каюмов К.М., Ковалев С.И.
21. А.с. № 1672952 СССР МКИ А 01 С 1/06. Устройство для дражирования семян: № 4727646/15; заявл. 25.08.1989; опубл. 30.08.1991. Бюл.№ 32 / Бородин И.Ф., Андреев С.А., Андержанов А.Л., Пивоваров Д.Н.
22. А.с. № 1688467 СССР МКИ Н 05 В 6/64. Устройство для СВЧ-обработки: № 4730130/09; заявл. 11.08.1989; опубл. 30.10.1991. Бюл.№ 40 : / Кузнецов С.Г., Михайлов М.Д., Андреев С.А., Андержанов А.Л.
23. А.с. № 1699364 СССР МКИ А 01 С 1/00. Установка для СВЧ-обработки: № 4309988 /15; заявл. 28.09.1987; опубл. 23.12. 1991. Бюл. № 47 / Андреев С.А., Андержанов А.Л., Ковалев С.И., Пипко А.И.
24. А.с. № 1722271 СССР МКИ А 01 В 47/00. Устройство для стерилизации: № 4783977/15; заявл.22.12.1989; опубл. 30.03.1992. Бюл.№ 12 / Алергант Г.И., З.Я.Жук, Кузнецов С.Г., Андержанов А.Л., Горин А.Д., Андреев С.А.

25. А.с. № 1782388 СССР МКИ А 01 С 1/06. Устройство для дражирования семян: № 4879989/15; заявл. 06.11.1990; опубл. 23.12.1992. Бюл.№ 47 / Андреев С.А., Андержанов А.Л., Старовойтов В.Н., Ленский Л.А., Пивоваров Д.Н.
26. А.с. № 1822630 СССР МКИ А 01 С 1/00, Н 05 В 6/68. Установка для СВЧ-обработки: № 4922734/15; заявл. 29.03.1991; опубл. 23.06.1993. Бюл.№ 23 / Бородин И.Ф., Андреев С.А., Андержанов А.Л. Соколов А.И.
27. Абрамовский Е.Р., Городько С.Н., Свиридов Н.В. Аэродинамика ветродвигателей. Днепропетровск: ДГУ, 1987.220 с.– Текст : непосредственный.
28. Аврамов Л. Центры обработки данных на основе политик и АСІ. Структура, концепции и методология / Л. Аврамов, М. Портолани // Вильямс. - 2015. 384 с.– ISBN 978-5-8459-2001-0. – Текст : непосредственный.
29. Андреев С.А. Использование озона для интенсификации горения в топках газовых водогрейных котлов / С.А.Андреев, Е.А.Петрова. – Текст : непосредственный // Энергосберегающие процессы и аппараты в пищевых и химических производствах: материалы международной научно-технической интернет-конференции («ЭПАХПП-2011») / Воронеж: Государственная технологическая академия. – Воронеж: ВГТА, 2011. – С. 162-167.
30. Андреев С.А. Исследование разложения озона при его подаче в топочную камеру газового котла / С.А.Андреев, Е.А.Петрова, Т.В.Иванова. – Текст : непосредственный // Повышение управленческого, экономического, социального и инновационно-технического потенциала отраслей и народнохозяйственных комплексов: сборник статей IV Международной научно-практической конференции / МНИЦ ПГСХА. – Пенза: РИО ПГСХА. 2012. – С.19-23.
31. Андреев С.А. Оценка эффективности термоэлектрических преобразователей в режиме тепловых насосов / С.А.Андреев, Е.В.Ходус. – Текст : непосредственный //Проблемы и перспективы развития мирового сельского хозяйства: Материалы III Международной научно-практической

конференции. / Под ред. И.Л.Воротникова. – Саратов: Издательство «КУБиК». 2012. – С. 165-170.

32. Андреев С.А. Автоматизация процесса дражирования семян / С.А.Андреев, Д.Н.Пивоваров. – Текст : непосредственный // Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического симпозиума «Проблемные вопросы автоматизации производства» 15 – 17 октября 1987 г. Всесоюзный совет научно-технических обществ. Комитет ВСНТО по автоматизации и механизации производственных процессов, 2 часть, – М.: 1987 – С.285-286.

33. Андреев С.А. Автоматизация процесса СВЧ-обработки сельскохозяйственных продуктов / И.Ф.Бородин, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Применение микроэлектроники и робототехники в сельском хозяйстве: тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции 17...19 ноября 1985 г. М. – Рига: ВИМ, 1985 – С.91.

34. Андреев С.А. Автоматизация управления скоростными режимами дражировщиков / С.А.Андреев, Д.Н.Пивоваров. – Текст : непосредственный // Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Автоматизация биотехнологических производств. Автоматизация-90» 24-25 сентября 1990 г., г.Пушино –М.: 1990 – С.34-35.

35. Андреев С.А. Автоматизированная система коммерческого учета водопотребления / С.А.Андреев, А.И.Матвеев. – Текст : непосредственный // Международная агроинженерия. Научно-технический журнал / Казахский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства, Алматы: 2015, № 1. – С.13-20.

36. Андреев С.А. Автоматизированная система коммерческого учета потребления воды / С.А.Андреев, А.И.Матвеев. – Текст : непосредственный // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. Труды 9-й Международной научно-технической конференции (21- 22 мая 2014 года, г.Москва, ГНУ ВИЭСХ). В 5-ти частях. Часть 5. Инфокоммуникационные технологии и нанотехнологии. – М.: ГНУ ВИЭСХ. – С.211-214.

37. Андреев С.А. Автоматизированная система учета водопотребления в АПК / С.А.Андреев, Н.Г.Кожевникова, А.И.Матвеев. – Текст : непосредственный // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2015. – № 3. – С. 10–14.
38. Андреев С.А. Автоматизированное оборудование для энергоресурсосберегающего управления поливом / С.А.Андреев, А.И.Ахиярtdинов. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы современной науки и образования: сборник статей XII Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». 2021. – С.66-71.
39. Андреев С.А. Автоматическая защита источников СВЧ энергии от аварийных режимов / Г.А.Шарков, А.И.Пипко, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Применение СВЧ энергии в энергосберегающих технологических процессах: тезисы докладов пятой научно-технической конференции – Саратов: Саратовский политехнический институт, 1986 – С.13-14.
40. Андреев С.А. Автоматический мелкосеменной дражирователь / Д.Н.Пивоваров, А.А.Беляев, А.Л.Андержанов, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Автоматизация производственных процессов в сельском хозяйстве: тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции 18...20 апреля 1989 г. – Минск: 1989 – С. 176-177.
41. Андреев С.А. Автоматическое сортирование объектов по кратчайшему пути / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Инновационные технологии в области технических наук / Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. № 1. г .Хабаровск: 2016.– С. 55-58.
42. Андреев С.А. Автоматическое управление оборудованием для энергосберегающей термообработки пищевых продуктов /С.А.Андреев, И.В.Тумаш. – Текст : непосредственный // Инновационные научные исследования; теория, методология практика Сборник статей XX

Международной научно-практической конференции – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение» – 2020. – С.53-57.

43. Андреев С.А. Автономное питание измерительно-передающих устройств в системах автоматического управления сельскохозяйственного назначения / С.А.Андреев, В.И.Загинайлов, А.И.Матвеев. – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина» – 2016. № 3 (73). – С. 63-68.
44. Андреев С.А. Автономное питание электронных измерительных устройств в системах орошения / С.А.Андреев, А.И.Матвеев. – Текст : непосредственный // Вопросы современных технических наук: свежий взгляд и новые решения, /Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. № 3, Екатеринбург: 2016. – С.31-36.
45. Андреев С.А. Автономное питание элементов телеметрических систем / А.И.Матвеев, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // SCIENCE AND EDUCATION: PROBLEM AND INNOVATIONS: сборник статей Международной научно-практической конференции – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2019. – С.44-47.
46. Андреев С.А. Адсорбционная сушка твердого вещества в озонированной среде // С.А.Андреев, Н.И.Гурецкий, И.В.Белюсова. – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина». – 2012. – № 2. – С.44–47.
47. Андреев С.А. Аккумуляция энергии в маломощных гелиосистемах автономного электроснабжения / С.А.Андреев, В.И.Загинайлов, Д.В.Шибаров. – Текст непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина» – 2017. № 5(81). – С. 70-76.
48. Андреев С.А. Алгоритм управления автоматизированным озонатором / С.А.Андреев, Е.А.Петрова. Текст : непосредственный //Робототехника в

сельскохозяйственных технологиях: материалы Международной научно-практической конференции 10-12 ноября 2014 г. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета, 2014.. – С. 290-294.

49. Андреев С.А. Алгоритм управления энергетическими потоками в автономной комбинированной системе электроснабжения. / С.А.Андреев, Н.Э.Поволоцкий. – Текст : непосредственный // EUROPEAN RESEARCH: Сборник статей XXXIV Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2021. – С.16-21.
50. Андреев С.А. Анализ баланса мощностей термоэлектрического теплового насоса / С.А.Андреев, А.А.Слепых. – Текст непосредственный // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы II Международной научно-практической конференции / Под ред. А.В.Павлова. – Саратов: Издательство «КУБиК». 2011 – С.10-14.
51. Андреев С.А. Анализ способов интенсификации горения природного газа в топках водогрейных котлов / С.А.Андреев, Е.А.Петрова, Н.И.Гурецкий. – Текст : непосредственный // Международный технико-экономический журнал. – 2015. – № 4. – С. 90–97.
52. Андреев С.А. Анализ технико-экологических ограничений использования возобновляемых источников энергии / С.А.Андреев, А.В.Вагин. – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина». – 2011. – № 1. – С.11–15.
53. Андреев С.А. Выбор гармонической составляющей для контроля режима работы СВЧ-генератора / А.Л.Андержанов, С.А.Андреев, А.И.Пипко. – Текст непосредственный // Моделирование и автоматизация технологических процессов сельскохозяйственного производства. Сборник научных трудов МИИСП – М.: МИИСП. 1987. – С.58-61.
54. Андреев С.А. Гибридное преобразование солнечной энергии / С.А.Андреев, Д.В.Шибаров. – Текст : непосредственный // Современные материалы, техника и технологии: научно-практический журнал. 2015, № 1

- (1) редкол.: Горохов А.А. (отв. Ред.): Юго-Зап. гос. Ун-т, Курск: 2015. – С.19-23.
55. Андреев С.А. Два способа снижения стоимости производства электронных схем / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Доклады ТСХА: Сборник статей. Вып.27\89. Ч.III. М.: Изд-во РГАУ – МСХА. 2016. – С. 274-276.
56. Андреев С.А. Двухдвигательный электропривод маломощной циркулярной пилы / С.А.Андреев, И.А.Полянский. – Текст : непосредственный // Наука, образование, инновации. Актуальные вопросы и современные аспекты: сборник статей VIII Международной научно-практической конференции. – Пенза: ЦМНС «Наука и Просвещение». 2021. – С.43-51.
57. Андреев С.А. Двухмерное моделирование течения жидкости через препятствие с применением метода решетчатых уравнений Больцмана / С.А.Андреев, А.И.Матвеев, А.И.Зданчук. – Текст : непосредственный // Международный научный журнал – 2017.№ 6. – С.52-60.
58. Андреев С.А. Динамическая коммутация ионистров в источниках питания элементов телеметрических систем / А.И.Матвеев, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный //Аграрный научный журнал – 2019. № 1. – С.76-81.
59. Андреев С.А. Динамическая модель процесса СВЧ воздействия на семена сельскохозяйственных растений / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Применение СВЧ энергии в энергосберегающих технологических процессах: тезисы докладов пятой научно-технической конференции – Саратов: Саратовский политехнический институт, 1986 – С.46.
60. Андреев С.А. Диэлектрическое осаждение пыли в помещениях с обогреваемыми полами / С.А.Андреев, В.М.Богоявленский, Л.Л.Иванова. – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горюхина» – 2019. № 4. – С.52-59.

61. Андреев С.А. Дрожирование семян в непрерывном режиме / С.А.Андреев, А.В.Балан. – Текст непосредственный // Инновационные научные исследования: теория, методология, практика: сборник статей VII Международной научно-практической конференции: В 2 ч. Ч.2. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2017. – С.35-40.
62. Андреев С.А. Импульсное устройство защиты СВЧ-генератора от аварийных режимов / С.А.Андреев, А.Л.Андержанов, А.И.Пипко. – Текст : непосредственный // Автоматика и электромагнитные поля в сельском хозяйстве. Сборник научных трудов МИИСП – М.: МИИСП. 1989 – С. 18-23.
63. Андреев С.А. Импульсный режим подключения грунтовых теплообменников в теплонасосных отопительных системах / С.А.Андреев, В.И.Загинайлов, Е.А.Флегонтов, Т.В.Иванова. – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина». – 2015. – № 6. – С. 39–44.
64. Андреев С.А. Исключение возникновения угарного газа при эксплуатации пиролизных котлов / С.А.Андреев, М.В.Зотова. – Текст : непосредственный // Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения: сборник статей XIII Международной научно-практической конференции, В.2, Ч.1. –Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2019. – С.55-58.
65. Андреев С.А. Использование ZIG-BEE-технологии в телеметрических системах сельскохозяйственного назначения /А.И.Матвеев, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Доклады ТСХА, выпуск 291, часть II. – М.: Издательство РГАУ-МСХА – 2019. – С.281-285.
66. Андреев С.А. Использование генераторных расходомеров в автоматизированных системах учета воды / А.И.Матвеев, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Инновационные технологии в АПК: теория и практика: сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции / МНИЦ ПГСХА. – Пенза: РИО ПГСХА, 2015. – С.94-97.

67. Андреев С.А. Использование микроволновой печи «Электроника» при СВЧ-обработке сельскохозяйственных продуктов / С.А.Андреев, Д.Н.Пивоваров. – Текст : непосредственный // Научно-технический бюллетень по электрификации сельского хозяйства, вып. 2 (57), – М.; ВИЭСХ. 1986. –С.25-32.
68. Андреев С.А. Использование полупроводниковых приборов для замены конденсаторов в схемах электронных устройств / С.А.Андреев, В.И.Загинайлов. – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина» – 2017. № 1(77). – С. 46-51.
69. Андреев С.А. Использование роботизированных манипуляторов для поштучной подачи и перемещения сельскохозяйственных продуктов / Р.Х.Юсупов, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина» – 2017. № 3(79). – С. 66-71.
70. Андреев С.А. Использование роботизированных устройств для сортировки сельскохозяйственных продуктов / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Техника и технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: Сборник статей II Международной научно-практической конференции / Под общ.ред.Г.Ю.Гуляева – Пенза «Наука и Просвещение» – 2016. – С.30-36.
71. Андреев С.А. Использование статического электричества при питании низкоэнергетических потребителей / С.А.Андреев, К.В.Королев. – Текст : непосредственный // Устойчивое развитие гонных территорий. Тезисы докладов участников III Международной конференции «Устойчивое развитие гонных территорий» 21-26 сентября 1998 г. Институт охраны окружающей среды республики Осетия – Алания – Владикавказ: 1998 – С.240-241.

72. Андреев С.А. Использование электрических полей для борьбы с варроатозом пчел / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Вестник АПК Ставрополя – 2019. № 2. – С.4-7.
73. Андреев С.А. Использование электрического поля для осаждения пыли в помещениях с обогреваемыми полами / С.А.Андреев, Е.А.Флегонтов. – Текст : непосредственный // Пленарные доклады и тезисы сообщений Международной научно-практической конференции «Инновационные энергосберегающие технологии». (8-9 ноября 2012 г.) – М.: ФГЮОУ ВПО МГАУ. 2012. – С.166-168.
74. Андреев С.А. Использование электростатического движителя для подачи окислителя в топочную камеру котла / С.А.Андреев, Е.А.Петрова. – Текст : непосредственный // Перспективное направление науки, техники и технологий: материалы II Международной научно-практической конференции (17 октября 2012 года), в 2-х томах. Том 1, редкол.: Горохов А.А. (отв. Ред.); Юго-Зап. гос. Ун-т, Курск, 2012. – С.31-35.
75. Андреев С.А. Использование явления ионного ветра в технологических процессах АПК / С.А.Андреев, В.И.Загинайлов, В.А.Воробьев. – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина» – 2017. № 6. – С. 72-77.
76. Андреев С.А. Исследование движения семян по наклонному транспортеру при их дражировании / С.А.Андреев, В.В.Дубов. – Текст : непосредственный // European Reseach: сборник статей XXXV Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2022. – С.56-61.
77. Андреев С.А. Исследование движения семян при дражировании в непрерывном режиме / С.А.Андреев, В.М.Карнаухов. – Текст : непосредственный // Международный технико-экономический журнал – 2021. № 6, 38-47 С.
78. Андреев С.А. Исследование динамики ионизации воздуха в рабочем пространстве электродинамического генератора / С.А.Андреев,

Н.М.Грустливый. – Текст : непосредственный // Энергетика, электротехнология и информатика в сельском хозяйстве. Сборник научных трудов МГАУ – М.: МГАУ. 1998 – С.29-33.

79. Андреев С.А. Исследование динамического баланса концентрации озона в топочной камере водогрейного котла / С.А.Андреев, Е.А.Петрова – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина». – 2014. – № 3. – С.11–13.

80. Андреев С.А. Исследование зависимости параметров цепи питания СВЧ-генератора от нагрузки / Г.А.Шарков, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Электроавтоматизация в сельских установках. Сборник научных трудов МИИСП – М.: МИИСП, 1985 – С.12-16.

81. Андреев С.А. Исследование количественных характеристик процесса перемещения ионов озона электростатическим движителем / С.А.Андреев, Е.А.Петрова. – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина». – 2013. – № 1. – С. 19–24.

82. Андреев С.А. Исследование параметров гидроэлектрического преобразователя для питания измерительно-передающих устройств / А.И.Матвеев, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Аграрный научный журнал – 2018, № 7. – С.47-51.

83. Андреев С.А. Исследование подачи озона в топочную камеру газового котла / С.А.Андреев, Е.А.Петрова. – Текст : непосредственный // Научные и технические средства обеспечения энергосбережения и энергоэффективности в экономике РФ: сборник научных трудов II Всероссийской научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во Политехнического университета. 2012 – С. 9-15.

84. Андреев С.А. Исследование распределения СВЧ-поля в пространстве рабочей камеры / А.А.Беляев, А.Л.Андержанов, С.А.Андреев, А.И.Соколов. –

Текст : непосредственный // Электропривод и электротехнология на объектах АПК. Сборник научных трудов МИИСП – М.: МИИСП. 1989 – С.12-21.

85. Андреев С.А. Исследование характеристик управляемых полупроводниковых конденсаторов / С.А.Андреев, Д.С.Илясов. – Текст : непосредственный // Вопросы технических наук: новые подходы в решении актуальных проблем / Сборник научных трудов по итогам III Международной научно-практической конференции. Инновационный Центр развития образования и науки, № 3, Казань: 2016. – С.119-127.

86. Андреев С.А. Исследование цепи питания магнетрона микроволнового генератора / С.А.Андреев, О.В.Мещанинова. – Текст : непосредственный // Наука и инновации в XXI веке: Актуальные вопросы, открытия и достижения: сборник статей V Международной научно-практической конференции. В 2 Ч. Ч.1 – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2017. – С..76-80.

87. Андреев С.А. Исследование энергетических показателей процесса разряда конденсаторов на переменную нагрузку. / А.И.Матвеев, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Международный технико-экономический журнал – 2018. № 3. – С.85-92.

88. Андреев С.А. К вопросу о возобновляемости углеводородных энергоносителей / С.А.Андреев, Ю.А.Судник, А.В.Вагин. – Текст непосредственный // Международный научный журнал. – 2011. – № 1.– С.81-88.

89. Андреев С.А. К вопросу оценки эффективности автономных энергетических источников / С.А.Андреев, А.В.Вагин. – Текст : непосредственный // Инновационное развитие агропромышленного комплекса и аграрного образования: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию ФГБОУ ВПО «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова. – Улан-Удэ: Изд-во БГСХА им. В.Р.Филиппова, 2011. – С.132-136.

90. Андреев С.А. К вопросу повышения эффективности преобразователей тепловой энергии / С.А.Андреев, А.А.Семина. – Текст : непосредственный //

Современные инновации в науке и техники: материалы II Международной научно-практической конференции (22марта 2012 года) / редкол.: Горохов А.А. (отв. Ред.); Юго-Зап. гос.ун-т. Курск: 2012. – С. 24-30.

91. Андреев С.А. К вопросу проектирования низкотемпературных отопительных систем / С.А.Андреев, Е.А.Флегонтов. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы III Международной научно-практической конференции./ Под ред. А.В.Павлова. – Саратов: ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет имени В.В.Вавилова» Издательство «Кубик», 2012 – С.9-13.
92. Андреев С.А. К вопросу управления концентрацией озона в топочной камере водогрейного котла / С.А.Андреев, Е.А.Петрова, Т.В.Иванова. – Текст :непосредственный // Международный технико-экономический журнал. – 2014. – № 5. – С.63–66.
93. Андреев С.А. К вопросу управления частотой вращения рабочего органа барабанного дражиратора / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Агропромышленный комплекс: состояние, проблемы, перспективы: сборник статей VIII Межданародной научно-практической конференции / МНИЦ ПГСХА. – Пенза: РИО ПГСХА, 2012. – С.6-10.
94. Андреев С.А. К объяснению механизма осушения силикагеля в озоновой среде / С.А.Андреев, И.В.Белоусова. – Текст : непосредственный // Конкурентоспособность предприятий и организаций : сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции / МНИЦ ПГСХА. – Пенза: РИО ПГСХА, 2012. – С.18-22.
95. Андреев С.А. К проблеме управления влажностью воздуха на объектах АПК / С.А.Андреев, И.В.Белоусова. – Текст : непосредственный // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: Труды 8-й Международной научно-технической конференции (16-17 мая 2012 года, Москва, ГНУ ВИЭСХ), часть 3 «Энергосберегающий технологии в животноводстве и стационарной энергетике». – М.: 2012 – С. 261-267.

96. Андреев С.А. Компенсация саморазряда ионисторов в блоках автономного питания слаботочных потребителей / А.И.Матвеев, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // ADVANCED SCIENCE: сборник статей IX Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2019. – С.64-67.
97. Андреев С.А. Компьютерная оценка эффективности эксплуатации ветроэлектрических установок / С.А.Андреев, В.Н.Старовойтов. – Текст непосредственный // Совершенствование эффективности сельской электрификации. Сборник научных трудов МГАУ – М.: МГАУ. 1996 – С.22...29.
98. Андреев С.А. Компьютерный расчет низкотемпературной системы отопления / С.А.Андреев, Е.А.Флегонтов. – Текст : непосредственный // Информационно-вычислительные технологии и их приложения: сборник статей XVII Международной научно-технической конференции. – Пенза: РИО ПГСХА, 2012. – С.10-16.
99. Андреев С.А. Контактная разность потенциалов в процессах электризации твердых тел в газовых потоках / С.А.Андреев, К.В.Королев. – Текст : непосредственный // Электрификация, автоматизация и компьютеризация сельского хозяйства. Сборник научных трудов МГАУ – М.: МГАУ. 2000 – С.69-76.
100. Андреев С.А. Малоэнергоемкий способ получения водяного пара и высокотемпературной воды / Л.А.Ленковский, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Энергосбережение в сельском хозяйстве. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции 5-7 октября 1998 г. ВИЭСХ – М.: ВИЭСХ – С.191-192.
101. Андреев С.А. Математическое моделирование реакции пламени на импульсную подачу озono-воздушной смеси / С.А.Андреев, Е.А.Петрова. – Текст : непосредственный // Модернизация сельскохозяйственного производства на базе инновационных машинных технологий и автоматизированных систем: сборник докладов XII Международной научно-

технической конференции (10-12 сентября 2012 г., г.Углич). ВИМ, М.: 2012. – С.205-212.

102. Андреев С.А. Математическое моделирование процесса распределения электромагнитного поля в пространстве микроволнового резонатора / С.А.Андреев, И.А.Ермакова. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы в современной науке: теория и практика / Сборник статей под ред. О.Н.Дидманидзе и др., 2018. – 125-133.

103. Андреев С.А. Математическое описание интенсификации горения импульсной подачей озono-воздушной смеси / С.А.Андреев, Е.А.Петрова. – Текст : непосредственный // Информационно-управляющие системы в АПК: материалы Международного научно-практического семинара, посвященного 90-летию профессора В.Т.Сергованцева .– М.: ФГБОУ ВПО МГАУ. 2012. – С.43-45.

104. Андреев С.А. Многодиапазонная сортировка объектов в роботизированных технологических процессах АПК / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Современные достижения в области технических наук//Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. № 1.г. Оренбург, 2016 – С.41-44.

105. Андреев С.А. Моделирование динамического баланса энергетических источников / С.А.Андреев, А.В.Вагин. – Текст : непосредственный // Перспективное развитие науки, техники и технологий: материалы Международной научно-практической конференции (7 октября 2011 года) / редкол.: Горохов А.А.(отв. Ред.); Юго-Западный государственный университет, Курск: 2011 – С.25-27.

106. Андреев С.А. Моделирование работы двухосевых турбинных ветродвигателей на ЭВМ /С.А.Андреев, В.Н.Старовойтов. – Текст : непосредственный // Применение электроэнергии и эксплуатация устройств сельского электроснабжения. Сборник научных трудов МИИСП – М: МИИСП. 1992 – С.41-49.

107. Андреев С.А. Моделирование режимов работы микроволнового генератора / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Автоматика и вычислительная техника в сельскохозяйственном производстве. Сборник научных трудов МИИСП – М.: МИИСП. 1990 – С.22-28.
108. Андреев С.А. Научно-методологические основы создания энергосберегающих технологий в сельскохозяйственном производстве / Л.А.Ленский, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Энергосбережение в сельском хозяйстве. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции 5-7 октября 1998 г.ВИЭСХ – М.: ВИЭСХ – С. 47-49.
109. Андреев С.А. Научные основы создания энергосберегающих технологий в сельскохозяйственном производстве / С.А.Андреев, Л.А.Ленский. – Текст : непосредственный // Современные энергосберегающие технологии и оборудование. Научно-методическая конференция энергетического факультета МГАУ – М.: МГАУ. 1999 – С.5-7.
110. Андреев С.А. Новая технология СВЧ-обработки почвы // С.А.Андреев, П.М.Уманский. – Текст : непосредственный // Природообустройство – 2018. № 4. – С.111-116.
111. Андреев С.А. О возможности использования ионных движителей в технологических процессах / С.А.Андреев, В.О.Овсянников. – Текст : непосредственный // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики. Материалы VI Международной научно-практической конференции «Наука – Технология – Ресурсосбережение» : Сборник научных трудов. – Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА. 2013. – Вып. 14. – С.8-13.
112. Андреев С.А. О возможности использования сверхвысокочастотного электромагнитного поля для борьбы с варроатозом пчел / И.Ф.Бородин, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Рациональная электрификация сельского хозяйства. Сборник научных трудов МИИСП. – М.: МИИСП, 1984 – С.3-6.

113. Андреев С.А. О возможности использования термоэлектрических преобразователей в системах автономного энергообеспечения / С.А.Андреев, Ю.А.Судник, А.А.Слепых. – Текст : непосредственный // Международный научный журнал. – 2011. – № 4. – С.49–55.
114. Андреев С.А. О практическом использовании рассеянной тепловой энергии окружающей среды / С.А.Андреев, Т.С.Крисанова. – Текст : непосредственный // Современные инструментальные системы: сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции (19-20 марта 2015 года) / редкол.: Горохов А.А. (отв.Ред.); в 4-х томах. Том 1, Юго-Зап. гос.ун-т, Курск: 2015. – С.78-82.
115. Андреев С.А. О целесообразности автономного энергообеспечения предприятий АПК / С.А.Андреев, А.В.Вагин. – Текст : непосредственный // Конкурентоспособность предприятий и организаций: сборник статей VII Всероссийской научно-практической конференции / МНИЦ ПГСХА. – Пенза: РИО ПГСХА. 2011 – С.9-13.
116. Андреев С.А. Об использовании генераторных первичных преобразователей в системах коммерческого учета воды / С.А.Андреев, А.И.Матвеев. – Текст : непосредственный // Современные материалы, техника и технологии: научно-практический журнал. 2015, № 2 (2) редкол.: Горохов А.А. (отв.Ред.): Юго-Зап. гос. Ун-т, Курск: 2015. – С.10-14.
117. Андреев С.А. Об эффективности системы автоматизированного учета потребления воды в режиме реального времени / С.А.Андреев, А.И.Матвеев. – Текст : непосредственный Доклады ТСХА: Сборник статей. Вып.289. Ч.1. М.; Изд-во РГАУ – МСХА. 2016.– С.5-7.
118. Андреев С.А. Обеспечение равномерности СВЧ-обработки сельскохозяйственных материалов в объемном резонаторе /Н.Е.Кабдин, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Международный технико-экономический журнал – 2018, № 5 – С.42-49.
119. Андреев С.А. Обобщение теории сифона / Л.А.Ленский, С.А.Андреев, В.И.Загинайлов. – Текст : непосредственный // Современные

энергосберегающие технологии и оборудование. Научно-методическая конференция энергетического факультета МГАУ – М.: МГАУ. 1999 – С.38-40.

120. Андреев С.А. Обобщенные вариационные принципы энергосберегающих технологий / Л.А.Ленский, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Энергосбережение в сельском хозяйстве. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции 5-7 октября 1998 г. ВИЭСХ – М.: ВИЭСХ – С.49-50.

121. Андреев С.А. Обоснование параметров конвективной системы отопления с применением теплового насоса / С.А.Андреев, Ю.А.Судник, Е.А.Флегонтов. – Текст : непосредственный // Международный научный журнал. – 2010. № 4.– С.92–96.

122. Андреев С.А. Обоснование параметров уравнивающей системы в ветродвигателях со взаимно перпендикулярными валами /С.А.Андреев, Н.А.Шевкун. – Текст : непосредственный // Международный технико-экономический журнал – 2021, № 2. – С. 107-115.

123. Андреев С.А. Обработка дражированных семян салата СВЧ электромагнитным полем / С.А.Андреев, Е.А.Лазарева. – Текст : непосредственный // Совершенствование электроснабжения и применения электроэнергии в агропромышленном комплексе. Сборник научных трудов МИИСП – М.: МИИСП, 1986 – С. 95-98.

124. Андреев С.А. Обработка семян овощных культур СВЧ-энергией / И.Ф.Бородин, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Достижения науки и техники АПК, 1987, № 7 – С. 25-26.

125. Андреев С.А. Озонирование среды сжигания топлива для улучшения состава дымовых газов водогрейных котлов / С.А.Андреев, Е.А.Петрова. – Текст : непосредственный // Экология: синтез естественно-научного, технического и гуманитарного знания. Материалы II Всероссийского научно-практического форума, Саратов, 6 -11 сентября 2011 г./ (редкол. А.В.Иванов,

И.А.Яшков. С.В.Шиндель и др.); Саратовский государственный технический университет – Саратов; Изд-во Сарат.гос. тех.уни-та, 2011 – С.225-227.

126. Андреев С.А. Определение алгоритма управления установкой для СВЧ-обработки семян / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Рационализация применения электроэнергии в производственных процессах: сборник научных трудов МИИСП, М.: 1987. С. 65-69.

127. Андреев С.А. Определение коэффициента использования энергии ветра ветродвигателей с перестраиваемыми лопастями / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Международный технико-экономический журнал – 2020, № 6. – С. 14-21.

128. Андреев С.А. Определение коэффициента использования энергии ветра карусельными ветродвигателями / С.А.Андреев, Л.В.Антоян. – Текст : непосредственный // Применение электроэнергии и эксплуатация устройств сельского электроснабжения. Сборник научных трудов МИИСП – М: МИИСП. 1992 – С.49-61.

129. Андреев С.А. Определение коэффициента полезного действия низкотемпературного термоэлектрического преобразователя / С.А.Андреев, А.А.Слепых. – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина». – 2011. – № 2. – С. 10–13.

130. Андреев С.А. Определение максимального количества гидромеханических преобразователей для автономного питания электронных устройств / А.И.Матвеев, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Open Innovation: сборник статей X Международной научно=практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2019. – С.46-51.

131. Андреев С.А. Определение мощности ветроагрегата с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей / С.А.Андреев, А.С.Андреев. – Текст : непосредственный // Эксплуатация устройств сельского электроснабжения. Сборник научных трудов МИИСП – М.: МИИСП 1991 – С. 42-54.

132. Андреев С.А. Определение рабочего объема в камере микроволновой установки периодического действия / С.А.Андреев, В.М.Карнаухов. – Текст : непосредственный // Международный технико-экономический журнал – 2018. № 4. – С.43-50.
133. Андреев С.А. Определение рабочих параметров ленточного дражиратора / С.А.Андреев, В.В.Дубов. – Текст : непосредственный // Агроинженерия – 2022, № 3 (24), С.27-32.
134. Андреев С.А. Определение устойчивости УКВ-радиосвязи на ЭВМ / С.А.Андреев, В.Н.Старовойтов. – Текст : непосредственный // Моделирование и управление в биоинформационных технологиях сельского хозяйства. Сборник научных трудов МГАУ – М.: МГАУ. 1997 – С.62-73.
135. Андреев С.А. Определение эквинапряженного пространства в рабочей камере сверхвысокочастотной установки циклического действия. / С.А.Андреев, Т.В.Иванова. – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина» – 2018. № 6. – С.56-64.
136. Андреев С.А. Оптико-электронная роботизированная система для сортировки сельскохозяйственной продукции / С.А.Андреев, Н.А.Шевкун. – Текст : непосредственный // Международный технико-экономический журнал – 2019, № 1. – С. 33-40.
137. Андреев С.А. Оптимизация конструкции двухосевого турбинного ветродвигателя / С.А.Андреев, Л.В.Антонян. – Текст : непосредственный // Применение электроэнергии в сельском хозяйстве. Сборник научных трудов МИИСП – М.: МИИСП. 1991 – С.62-72.
138. Андреев С.А. Оптимизация конструкции двухосевых устройств для кошения растений / Д.В.Анашин, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Международный технико-экономический журнал – 2021, № 3. – С. 45-53.
139. Андреев С.А. Опыт минимизации межосевого расстояния двухосевых ветродвигателей / С.А.Андреев, В.Н.Старовойтов. – Текст : непосредствен-

ный // Моделирование, автоматика и вычислительная техника в сельском хозяйстве. Сборник научных трудов МГАУ – М.: МГАУ. 1994 – С.122-132.

140. Андреев С.А. Особенности подачи озона в топочную камеру газового котла / С.А.Андреев, Е.А.Петрова. – Текст : непосредственный // Современные методы обеспечения эффективности и надежности в энергетике: труды Всероссийской конференции с международным участием 24-26 мая 2012 года / Отв. ред. Е.Э.Овчарова. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. –Изд-во Политехн.ун-та,2012. – С.263-282.

141. Андреев С.А. Особенности разработки отопительных систем с использованием низкопотенциальных природных энергоносителей / С.А.Андреев, Е.А.Флегонтов. – Текст : непосредственный // Природноресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России: сборник статей X Международной научно-практической конференции / МНИЦ ПГСХА. – Пенза: РИО ПГСХА. 2012. – С.5-10.

142. Андреев С.А. Особенности эксплуатации биогазовых установок со смещенными циклами анаэробного сбраживания / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Инновационные технологии в АПК: теория и практика // Сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции МНИЦ ПГСХА.: Пенза: РИО ПГСХА, 2016. – С.24-27.

143. Андреев С.А. Осушение воздуха в производственных помещениях АПК / С.А.Андреев, П.Л.Мещанинова. – Текст : непосредственный // Инновационное развитие АПК: проблемы и перспективы: сборник материалов международной научно-практической конференции (9 декабря 2015 года): в 2-х ч.: Ч.II.: Смоленск: ФГБОУ ВО Смоленская ГСХА, 2015. – С.206-212.

144. Андреев С.А. Осциллирующий режим подключения грунтовых теплообменников в теплонасосных отопительных системах / С.А.Андреев, Е.А.Флегонтов. – Текст : непосредственный // Новые технологии и проблемы технических наук / Сборник научных трудов по итогам международной

научно-практической конференции. (10 ноября 2015 г.) № 2, г.Красноярск: 2015. – С.28-31.

145. Андреев С.А. Оценка гипотез по объяснению электризации твердых тел в газовых потоках / С.А.Андреев, К.В., Королев. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов. М.: МГАУ им. В.П.Горячкина, 1999 – С.83-88.

146. Андреев С.А. Оценка параметров силовых ветродвигателей с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей. – Текст : непосредственный / С.А.Андреев // Международный технико-экономический журнал – 2020, № 3, – С.83-91.

147. Андреев С.А. Оценка энергетических показателей роботизированных газонокосилок. / Д.В.Анашин, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина» – 2018. № 5. – С.63-69.

148. Андреев С.А. Оценка энергозатрат на озонирование топочного пространства водогрейных котлов / С.А.Андреев, Е.А.Петрова. – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина». – 2015. – № 2. – С.33–37.

149. Андреев С.А. Оценка эффективности инерционных динамических аккумуляторов в системах автономного электроснабжения / С.А.Андреев, Д.В.Шибаров. – Текст : непосредственный // INTERNATIONAL INNOVATION RESEARCH: сборник статей VI Международной научно-практической конференции / Под общ.ред. Г.Ю.Гуляева – Пенза: МЦНС «Наука и просвещение» – 2017. – С.51-54.

150. Андреев С.А. Оценка эффективности маломощных гелиосистем / Д.В.Шибаров, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный //Современные достижения в области технических наук//Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. № 1.г. Оренбург, 2016 – С.14-17.

151. Андреев С.А. Оценка эффективности методов утилизации отходов сельскохозяйственного производства / С.А.Андреев, А.В.Вагин. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы экологии и природопользования: Материалы II Международной научно-практической конференции (г.Ставрополь, 13–14 мая 2011 года) – Ставрополь: ставропольское издательство «Параграф», 2011 – С. 25-29.
152. Андреев С.А. Оценка эффективности преобразования энергии в системах энергоснабжения объектов АПК / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Инновации в сельском хозяйстве. Теоретический и научно-практический журнал 5(20)/ 2016, по итогам 10-й Международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве» 24-25 мая 2016 г. Издательство ФГБНО «ВИЭСХ». М.: 2016. – С. 41-50.
153. Андреев С.А. Оценка эффективности электрогидродинамических генераторов / С.А.Андреев, Н.М.Грустливый. – Текст : непосредственный // Современные энергосберегающие технологии и оборудование. Научно-методическая конференция энергетического факультета МГАУ – М.: МГАУ. 1999 – С.23-24.
154. Андреев С.А. Оценка эффективности энергетических источников с учетом рабочего пространства преобразователей / С.А.Андреев, А.В.Вагин. – Текст : непосредственный // Природообустройство. Научно-практический журнал ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет природообустройства». – 2011. – № 5. – С. 92–96.
155. Андреев С.А. Переоборудование печей «Электроника» / Г.А.Шарков, С.А.Андреев, А.Н.Сабетов. – Текст : непосредственный // Техника в сельском хозяйстве, 1986. № 6 – С.29-30.
156. Андреев С.А. Перспективы совершенствования тепловых насосов / С.А.Андреев, А.А.Семина. – Текст : непосредственный // Научное обеспечение развития АПК России: сборник статей II Всероссийской научно-

практической конференции / МНИЦ ПГСХА. – Пенза:РИО ПГСХА, 2012. – С.8-12.

157. Андреев С.А. Повышение надежности установок для СВЧ-обработки сельскохозяйственных продуктов / И.Ф.Бородин, Г.А.Шарков, С.А.Андреев/ – Текст : непосредственный // Автоматика и вычислительная техника в сельскохозяйственном производстве. Сборник научных трудов МИИСП – М.: МИИСП. 1986 – С.3-6.

158. Андреев С.А. Повышение равномерности выхода биогаза в биогазовых установках периодического действия / С.А.Андреев, О.В.Мещанинова/ – Текст : непосредственный // SCIENCE AND EDUCATION: PROBLEMS AND INNOVATIONS: Сборник статей II Международной научно-практической конференции – Пенза: МЦНС: «Наука и Просвещение» – 2019. – С.13-15.

159. Андреев С.А. Повышение эффективности ветродвигателей с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей / С.А.Андреев/ – Текст : непосредственный // Международный технико-экономический журнал – 2021, № 4, С.71-79.

160. Андреев С.А. Повышение эффективности регенерации силикагеля в адсорбционных осушителях воздуха / С.А.Андреев, В.И.Загинайлов, П.Л.Мещанинова/ – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина» – 2016. № 1 (71). – С. 57-61.

161. Андреев С.А. Повышение эффективности термоэлектрических преобразователей / С.А.Андреев, Е.В.Ходус/ – Текст : непосредственный // Наука. Техника. Инновации. 2014: сборник статей Международной научно-технической конференции (25 – 27 марта 2014 г., г.Брянск) / Под общей редакцией А.Л.Сафонова. – Брянск: НДМ, 2014. – С. 348-352.

162. Андреев С.А. Получение технического углерода для нужд АПК / С.А.Андреев, М.А.Звягина/ – Текст : непосредственный // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы IX Международной научно-практической конференции (22-23

марта 2012 г.) / редкол.: Горохов А.А.(отв.Ред.); Юго-Западный государственный университет. Курск: 2012 – С.21-25.

163. Андреев С.А. Предотвращение аварийных режимов в СВЧ-установках сельскохозяйственного назначения / С.А.Андреев, В.И.Загинайлов, В.А.Воробьев. – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина» – 2016. № 5 (75). – С. 60-67.

164. Андреев С.А. Предотвращение промерзания грунта при эксплуатации теплонасосных отопительных систем / С.А.Андреев, С.П.Рудобашта, Флегонтов Е.А. – Текст : непосредственный // Международный технико-экономический журнал. – 2015. – № 5. – С.77–83.

165. Андреев С.А. Предпосевная обработка семян огурцов сверхвысокочастотным электромагнитным полем / С. А.Андреев, Д.Н.Пивоваров/ – Текст : непосредственный // Автоматический контроль и управление в сельском хозяйстве. Сборник научных трудов МИИСП – М.: МИИСП, 1984 – С.77-80.

166. Андреев С.А. Предпосевная обработка семян энергией сверхвысокочастотного электромагнитного поля / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Тезисы докладов конференции «Методы предпосевной обработки семян сельскохозяйственных культур электромагнитными полями», М.: ВСХИЗО. 1989. – С. 16-17.

167. Андреев С.А. Применение ионисторов в блоках автономного питания систем управления поливом / А.И.Матвеев, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей V Международной научно-практической конференции. В 4 ч. Ч.4. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2017. – С.122-125.

168. Андреев С.А. Принцип построения ветродвигателей с электроуправляемыми лопастями /С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Высокоэффективные электротехнологии по производству продуктов

сельского хозяйства, их переработке и хранению. Всероссийский научно-технический семинар МГАУ – М.: 1993 – С.74-75.

169. Андреев С.А. Простой способ распознавания аварийного режима в СВЧ-установках порционного действия / С.А.Андреев, О.В.Мещанинова. – Текст : непосредственный // European Scientific Conference: сборник статей V Международной научно-практической конференции. В 3 ч. Ч.1 – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2017. – С.162-165.

170. Андреев С.А. Распознавание аварийных режимов работы СВЧ-генераторов по уровню низкочастотной энергии рассеяния / С.А.Андреев, А.А.Столбунов – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы науки и техники. Сборник научных трудов по итогам III международной научно-практической конференции (11 апреля 2016 г) . Инновационный Центр развития образования и науки, Самара, 2016. – С.136-140.

171. Андреев С.А. Резервы экономии ресурсов в энергообеспечении объектов АПК / С.А.Андреев, Е.И.Сухова. – Текст : непосредственный // Совершенствование управления научно-технологическим процессом в современных условиях: сборник статей IX Международной научно-практической конференции / МНИЦ ПГСХА. – Пенза: РИО ПГСХА. 2011 – С.11-15.

172. Андреев С.А. Ресурсосберегающая мойка разногабаритной сельскохозяйственной техники / С.А.Андреев – Текст : непосредственный // European Scientific Conference: сборник статей XXV Международной научнопрактической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2021. – С.15-19.

173. Андреев С.А. Ресурсосберегающее автономное теплоснабжение объектов АПК / С.А. Андреев, Ю.А. Судник, Е.А. Петрова. – Текст : непосредственный / Международный научный журнал. – 2011. – № 5. – С. 83–91.

174. Андреев С.А. Ресурсосберегающие схемные решения при проектировании электронных устройств / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Перспективы развития технических наук / Сборник научных

трудов по итогам международной научно-практической конференции. Инновационный Центр развития образования и науки, выпуск 3, Челябинск. 2016. – С.53-63.

175. Андреев С.А. Ресурсосберегающий способ повышения эффективности газовых котлов / С.А.Андреев, Е.А.Петрова // Опыт и проблемы управления модернизацией инновационной деятельности в социально-экономических и технических системах: монография / Под общ.ред. В.В.Бондаренко. – Пенза. РИО ПГСХА, 2012. – С.71...93. – ISBN 978-5-94338-565-0 – Текст непосредственный.

176. Андреев С.А. Роботизированная система для сортировки сельскохозяйственной продукции / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Технические науки: тенденции, перспективы и технологии развития, / Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. №3. г.Волгоград. – 2016. –С.144-148.

177. Андреев С.А. Роботизированные системы многодиапазонной сортировки сельскохозяйственных продуктов / С.А.Андреев, Р.Х.Юсупов. – Текст : непосредственный // Международный научный журнал – 2017, № 5, – С.72-76.

178. Андреев С.А. Самообучающаяся оптико-электронная система сортировки картофеля / С.А.Андреев, Ю.А.Судник. – Текст : непосредственный // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении [Текст]: сборник научных статей 2-й Международной научно-практической конференции 16-17 февраля 2017 года)/ редкол.: Горохов А.А. (отв.Ред.); Юго-Зап. гос.ун-т, ЗАО «Университетская книга», Курск, 2017 – С.16-21.

179. Андреев С.А. Снижение энергопотребления телеметрическими системами сельскохозяйственного назначения. /С.А.Андреев, В.П.Воробьев, А.И.Матвеев – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горякина» – 2019. № 1. – С.60-65.

180. Андреев С.А. Совершенствование интеллектуальных беспроводных телеметрических систем / С.А.Андреев, А.И.Матвеев. – Текст : непосредственный // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XXIV Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение» – 2019. С.22-26.
181. Андреев С.А. Совершенствование конструкций карусельных ветродвигателей / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Применение электроэнергии и эксплуатация устройств систем электроснабжения сельского хозяйства. Сборник научных трудов МГАУ – М.: МГАУ. 1993 – С. 66-77.
182. Андреев С.А. Совершенствование конструкций электронезависимых водогрейных котлов с озоновым наддувом / Е.А.Петрова, С.А.Андреев – Текст : непосредственный // Международный научный журнал. – 2013. – № 5. – С.71–76.
183. Андреев С.А. Совершенствование устройств защиты СВЧ-установок от аварийных режимов / И.Ф.Бородин, С.А.Андреев, А.Л.Андержанов. – Текст : непосредственный // Вычислительная техника в управлении сельскохозяйственным производством. Сборник научных трудов МИИСП – М.: МИИСП. 1989 – С.20-24.
184. Андреев С.А. Советуем: дражируйте семена / Г.А.Шарков, С.А.Андреев, А.Н.Сабетов. – Текст : непосредственный // Приусадебное хозяйство 1986, № 5 – С.33-34.
185. Андреев С.А. Способ поштучной подачи объектов /С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Технические науки в мире: от теории к практике / Сборник научных трудов по итогам Международной научно-практической конференции. Инновационный Центр развития образования и науки, № 3, г.Росто-на-Дону. 2016. – С.95-100.
186. Андреев С.А. Сравнительный анализ централизованного и децентрализованного принципов теплоснабжения объектов АПК / Л.Л.Иванова, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // INTERNATIONAL

INNOVATION RESEACH: сборник статей VII Международной научно-практической конференции / Под общ.ред. Г.Ю.Гуляева – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2017. – С.32-36.

187. Андреев С.А. Статическое уравнивание лопастей карусельных ветродвигателей / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Применение электроэнергии и эксплуатация устройств систем электроснабжения сельского хозяйства. Сборник научных трудов МГАУ – М.: МГАУ. 1993 – С. 77-85.

188. Андреев С.А. Термоэлектрические преобразователи в системах автономного энергообеспечения объектов АПК / С.А.Андреев, Е.В.Ходус. – Текст : непосредственный // Современные материалы , техника и технологии: материалы Международной научно-практической конференции (22 декабря 2011 года) / редкол.: Горохов А.А. (отв.Ред.); Юго-Западный государственный университет, Курск: 2011 – С. 24-29.

189. Андреев С.А. Технические средства для осциллирующего подключения грунтовых теплообменников в системах отопления с тепловыми насосами / С.А.Андреев, В.И.Загинайлов. – Текст : непосредственный // Международный технико-экономический журнал – 2019, № 6. – С.28-39.

190. Андреев С.А. Техническое средство для предотвращения промерзания грунта при эксплуатации теплонасосных отопительных систем / С.А.Андреев, Е.А.Флегонтов // Экологические основы прогрессивных технологий: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции – Пенза: РИО ПГСХА, 2015. – С. 11-17.

191. Андреев С.А. Управление двухдвигательным электроприводом маломощных циркулярных пил / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Доклады ТСХА, выпуск 290, часть II, М.: Издательство РГАУ МСХА, 2018. – С.170-172.

192. Андреев С.А. Управление энергетическими потоками в системах комбинированного электроснабжения объектов АПК / С.А.Андреев,

В.И.Загинайлов. – Текст : непосредственный // Агроинженерия – 2021, № 6 (106), С.68-73.

193. Андреев С.А. Управляемые полосовые фильтры на полупроводниковых диодах / С.А.Андреев, Д.С.Илясов. – Текст : непосредственный // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях. Сборник научных трудов VI Международной научно-практической конференции(2 – 3 июня 2016 года) редкол: Горохов А.А. (отв.ред.). Юго-Зап. гос. ун-т, ЗАО «Университетская книга», Курск, 2016. – С. 26-30.

194. Андреев С.А. Управляемый двухдвигательный электропривод маломощных циркулярных пил // С.А.Андреев, Н.Е.Кабдин, В.Ф.Сторчевой. – Текст : непосредственный // Агроинженерия 2022, том 24, № 1,– С.65-71

195. Андреев С.А. Уравновешивание ветродвигателей с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей / С.А.Андреев, Н.Е.Кабдин. – Текст : непосредственный // Перспективы науки. – 2019. № 8. – С.27-32.

196. Андреев С.А. Установка для СВЧ-обработки сельскохозяйственных продуктов / Г.А.Шарков, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Электрифицированные методы обработки пищевых продуктов: материалы V Всесоюзной научно-технической конференции – М.: МТИММП, 1985 – С.75.

197. Андреев С.А. Устройство для определения наличия продуктов в микроволновом резонаторе / С.А.Андреев, А.А.Столбунов. – Текст : непосредственный // Современные материалы, техника и технологии: научно-практический журнал. 2016, № 1(4) редкол.: Горохов А.А. (отв.Ред.): Юго-Зап. гос. Ун-т, Курск: 2016. – С.24-30.

198. Андреев С.А. Устройство защиты микроволнового генератора от аварийных режимов / И.Ф.Бородин, Г.А.Шарков, С.А.Андреев, А.Л.Андержанов, А.И.Пипко, А.С.Буров. – Текст : непосредственный // Вузовская наука – производству. Научно-технические разработки института, используемые агропромышленным комплексом страны (сборник) МИИСП – М.: МИИСП, 1988 – С.52-54.

199. Андреев С.А. Утилизация кинетической энергии жидкого теплоносителя в коллекторных гелиосистемах / С.А.Андреев, Н.Г.Кожевникова, Д.В.Шибаров. – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина» – 2018. № 4. – С. 69-74.
200. Андреев С.А. Экологическая релаксация возобновляемых источников энергии / С.А.Андреев, А.В.Вагин. – Текст : непосредственный // Экологические аспекты развития АПК. Материалы научно-практической конференции, посвященной 75-летию со дня рождения профессора В.Ф.Кормилицына. Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И.Вавилова – Саратов. 2011 – С.8-10.
201. Андреев С.А. Экологические аспекты эксплуатации ветроэлектрических станций / С.А.Андреев, Н.М.Грустливый. – Текст : непосредственный // Совершенствование эффективности сельской электрификации. Сборник научных трудов МГАУ – М.: МГАУ. 1996 – С.93-97.
202. Андреев С.А. Экспериментальное исследование горения в озон-воздушной среде / С.А.Андреев, Е.А.Петрова. // Международный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 84–90.
203. Андреев С.А. Экспериментальные исследования дражирования семян в барабанном дражираторе / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Агроинженерия – 2022. № 5, С. 16-23.
204. Андреев С.А. Электродинамический метод получения аэрозоля в мелкосеменных дражираторах / И.Ф.Бородин, Д.Н.Пивоваров, С.А.Андреев, А.Л.Андержанов. – Текст : непосредственный // Техника в сельском хозяйстве 1991, № 4, – С.46-47.
205. Андреев С.А. Электродинамические преобразователи кинетической энергии движущихся газов / С.А.Андреев, Н.М.Грустливый. – Текст : непосредственный // Автоматизация сельскохозяйственного производства. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции 13...16 мая 1997 г. ВИМ – М.: ВИМ. 1997 – 81-83.

206. Андреев С.А. Электронное устройство для автоматического управления теплонасосной отопительной системой / С.А.Андреев, Е.А.Флегонтов. – Текст : непосредственный // Современные материалы, техника и технологии: научно-практический журнал. 2015, № 2 (2) редкол.: Горохов А.А. (отв.Ред.): Юго-Зап. гос. Ун-т, Курск: 2015. – С.14-19.
207. Андреев С.А. Электрооборудование для ресурсо-энергосбережения в системах водообеспечения объектов АПК / С.А.Андреев, А.И.Матвеев. – Пенза; МЦНС Наука и Просвещение – 2020.–190 с.– ISBN 978-5-00159-549-6.– Текст непосредственный.
208. Андреев С.А. Электропитание измерительно-передающих устройств в телеметрических системах сельскохозяйственного назначения /С.А..Андреев, А.И. Матвеев. – Текст : непосредственный // Международный технико-экономический журнал – 2018, № 2. – С. 34-39.
209. Андреев С.А. Электротехнологические приемы в процессе дражирования семян / С.А.Андреев, В.И.Загинайлов, В.И.Тарушкин. // Международный научный журнал – 2016. № 4 – С.79-86. – Текст : непосредственный.
210. Андреев С.А. Электротехнологические приемы энергоресурсосбережения в системах автономного теплообеспечения объектов АПК / – С.А.Андреев. // ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А.Тимирязева – М.: ООО «Мегаполис», 2020. – 168с. – ISBN 978-5-6044309-9-6. – Текст : непосредственный
211. Андреев С.А. Электротехнологические способы и технические средства ресурсосберегающего дражирования семян / С.А.Андреев, В.В.Дубов. // ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А.Тимирязева – М.: ООО «Мегаполис», 2023. – 150 с. – ISBN 978-5-6049928-4-5. – Текст : непосредственный
212. Андреев С.А. Электротехнологические способы ресурсосбережения в газовых водогрейных котлах и технические средства для их осуществления / С.А.Андреев.// ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К.А.Тимирязева – М.: ООО

«Мегаполис», 2020. – 135 с.–ISBN 978-5-60-44861. – Текст : непосредственный.

213. Андреев С.А. Электротехнологический прием борьбы с варроатозом пчел / С.А.Андреев, В.И.Загинайлов. – Текст : непосредственный // Международный технико-экономический журнал – 2018, № 1. – С.59-66.

214. Андреев С.А. Электротехнологический способ улучшения эксплуатационных показателей газовых котлов / Е.А.Петрова, С.А.Андреев – Текст : непосредственный // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Ч.II. – СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2012. – С.116-118.

215. Андреев С.А. Электротехнологический способ управления горением в пиролизных котлах / С.А.Андреев, В.И.Загинайлов, В.А.Воробьев. – Текст : непосредственный //Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горюхина» – 2019, № 2. – С. 53-58.

216. Андреев С.А. Энергетика движения жидкости в замкнутом контуре под влиянием разности температур / С.А.Андреев, Д.В.Шибаров. – Текст : непосредственный //Научные исследования: теория, методика и практика: материалы Международной научно-практической конференции (Чебоксары. 21 мая 2017 г.). В 2 т. Т.1/ редкол.: О.Н.Широков [и др.] – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс». 2017. – С.254-257.

217. Андреев С.А. Энергонезависимое поддержание уровня теплоносителя в автономных отопительных системах / С.А.Андреев, Д.В.Шибаров. – Текст : непосредственный // Современные материалы, техника и технологии: научно-практический журнал. 2015, № 3(3) редкол.: Горохов А.А. (отв.Ред.): Юго-Зап. гос. Ун-т, Курск: 2015. – С.17-23.

218. Андреев С.А. Энерго-ресурсосберегающие технологии в управлении орошением / С.А.Андреев, А.И.Матвеев. – Текст : непосредственный // Сборник статей научно-практической конференции, посвященной памяти академика И.Ф.Бородина Передовые достижения в применении

автоматизации, роботизации и электротехнологий в АПК. – М.: Мегapolis. – С.285-297.

219. Андреев С.А. Энерго-ресурсосберегающий способ управления поливом / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Природообустройство – 2017. № 5. – С.95-102.

220. Андреев С.А. Энергоресурсосбережение в микроволновых установках сельскохозяйственного назначения /С.А.Андреев, В.И.Загинайлов /ФГБОУ – МСХА имени К.А.Тимирязева – М.: ООО «Мегapolis», 2020. – 126 с.– ISBN 078-5-6044309-7-2. Текст непосредственный.

221. Андреев С.А. Энергосберегающая сушка древесины / С.А.Андреев, В.Ю.Евченко. – Текст : непосредственный // WORLD SCIENCE PROBLEMS AND INNOVATION: сборник статей IX Международной научно-практической конференции / в 2 ч. Ч1– Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2017. – С.208-212

222. Андреев С.А. Энергосберегающее осушение воздуха на объектах АПК / С.А.Андреев, П.Л.Мещанинова. – Текст : непосредственный // Техника и технологии: пути инновационного развития: материалы II Международной научно-практической конференции (29 июля 2012 года) редкол.: Горохов А.А. (отв. Ред.); Юго-Зап. гос. Ун-т Курск: 2012. – С.30-35.

223. Андреев С.А. Энергосберегающее управление влажностью воздуха на объектах АПК / С.А.Андреев, Ю.А.Судник, И.В.Белоусова. – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный аграрноинженерный университет имени В.П.Горякина». – 2010. – № 2. – С. 7–12.

224. Андреев С.А. Энергосберегающий дистанционный контроль параметров технологических процессов в АПК / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Наука и бизнес: пути развития. – 2019. № 9. – С.20-25.

225. Андреев С.А. Энергосберегающий дистиллятор / Л.А.Ленский, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный / Энергосбережение в сельском

- хозяйстве. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции 5-7 октября 1998 г. ВИЭСХ – М.: ВИЭСХ – С. 193-194.
226. Андреев С.А. Энергосберегающий дистиллятор и очиститель сточных вод / Л.А.Ленский, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Современные энергосберегающие технологии и оборудование. Научно-методическая конференция энергетического факультета МГАУ – М.: МГАУ. 1999 – С.36-37.
227. Андреев С.А. Энергосберегающий пастеризатор молока / С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // World Science: Problems and Innovations: сборник статей LXVIII Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение» – 2022 – С.14-18.
228. Андреев С.А. Энергосберегающий способ подачи окислителя в топочную камеру водогрейного котла / С.А.Андреев, Е.А.Петрова. – Текст : непосредственный // Пленарные доклады и тезисы сообщений Международной научно-практической конференции «Инновационные энергосберегающие технологии». (8-9 ноября 2012 г.) – М.: ФГЮОУ ВПО МГАУ. 2012. – С.168-170.
229. Андреев С.А. Энергосберегающий способ получения высокотемпературного водяного пара и воды / Л.А.Ленский, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Современные энергосберегающие технологии и оборудование. Научно-методическая конференция энергетического факультета МГАУ – М.: МГАУ. 1999 – С.37-38.
230. Андреев С.А. Энергоэффективная сушка древесины / С.А.Андреев, А.А.Семина. – Текст : непосредственный // Современные инновации в науке и технике: Сборник научных трудов 4-й Международной научно-практической конференции (17 апреля 2014 года) / редкол.: Горохов А.А. (отв.Ред.); в 4-х томах, Том 1, Юго-Зап. гос. ун-т. Курск: 2014 – С. 58-61.
231. Андреев С.А. Эффективность использования химических и маховичных накопителей энергии в автономных гелиосистемах / Д.В.Шибаров, С.А.Андреев – Текст : непосредственный // EUROPEAN RESEARCH :

сборник статей VII Международной научно-практической конференции / Под общ.ред. Г.Ю.Гуляева – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение» –2016 – С.49-52.

232. Андреев С.А. Эффективность котлов с озоновым наддувом / С.А.Андреев, Е.А.Петрова. – Текст : непосредственный // Научное обеспечение развития АПК в условиях реформирования: Материалы научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов СПбГАУ (Санкт-Петербург–Пушкин: 26-28 января 2012 года). СПб.:2012 – С. 357-360.

233. Андреев С.А. Эффективность облучения дражированных семян СВЧ-полем / Г.А.Шарков, В.П.Шахматов, С.А.Андреев. – Текст : непосредственный // Повышение экономичности и надежности электрификации сельского хозяйства. Сборник научных трудов МИИСП – М.: МИИСП, 1985 – С. 17-20.

234. Андреев С.А., Дубов В.В. Исследование зависимости диэлектрической проницаемости дражируемой массы от размеров драже / С.А.Андреев, В.В.Дубов. – Текст : непосредственный // Агроинженерия – 2023, № 1, С.86-90.

235. Андреев С.А., Королев К.В. Физические предпосылки электризации твердых тел в газовых потоках / С.А.Андреев, К.В.Королев. – Текст непосредственный // Современные энергосберегающие технологии и оборудование. Научно-методическая конференция энергетического факультета МГАУ – М.: МГАУ. 1999 – С.81...82.

236. Андреев С.А., Сторчевой В.Ф., Кабдин Н.Е. Эффективность использования термоэлектрических сборок для преобразования тепловой энергии грунтовых вод / С.А.Андреев, В.Ф.Сторчевой, Н.Е.Кабдин. – Текст : непосредственный // World Science: Problems and Innovations: сборник статей LXVIII Международной научно-практической конференции. – /Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение» – 2022 – С.19-25.

237. Андреев С.А.Разработка алгоритма управления озонатором / С.А.Андреев, Е.А.Петрова. – Текст : непосредственный // Вестник ФГБОУ

ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина». – 2014. – № 2. – С.26–29.

238. Ахметов, Н.С. Актуальные вопросы курса неорганической химии: книга для учителя / Н.С. Ахметов. — М.: Просвещение, 1991.—224 с.— ISBN 5-09-002630-0 .– Текст : непосредственный.

239. Б.Соренсен Преобразование, передача и аккумуляция энергии: учебно-справочное руководство / Б.Соренсен – Долгопрудный : Издательский Дом «Интеллект», 2011. – 296 с. – ISBN 978-5-91559-056-3. – Текст : непосредственный.

240. Большая Российская энциклопедия: в 30 т. / Председатель науч.-ред. Совета Ю.С. Осипов. Отв. Ред. С.Л. Кравец. Т. 2. Анкилоз – Банка. – М.: Большая Российская энциклопедия, 2005. – 766 с. – ISBN 5-85270-326-5. – Текст : непосредственный.

241. Бородин И.Ф. Источники энергии и энергосбережение / И.Ф.Бородин. – Текст : непосредственный // Источники энергии и энергосбережение. Энергообеспечение и \нергосбережение в сельском хозяйстве. Труды ВИЭСХ, М.: ГНУ ВИЭСХ, 2002 – С.460-468.

242. Бородин И.Ф., Андреев С.А. Автоматизация технологических процессов и системы автоматического управления: учебник для средних специальных учебных заведений /И.Ф.Бородин, С.А.Андреев.– М.: КолосС, 2005. –351 с. – ISBN 5-9532-0140-0. – Текст : непосредственный.

243. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. М.: 1980. –976 с.– Текст : непосредственный.

244. Буре В.М. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник/ В.М. Буре, Е.М. Парилина. — СПб.: Издательство «Лань», 2013. — 416 с.— ISBN 978-5-8114-1508-3.— Текст : непосредственный.

245. Велигоша А.В. Общая теория связи: учебное пособие / А.В. Велигоша - Ставрополь: СКФУ, 2014. 240 с.– Текст : непосредственный.

246. Ветродвиатель. Заявка на изобретение Великобритании № 2196699. кл. F 03 D.
247. Ветродвиатель. Заявка на изобретение Польской народной республики №265323, кл. F 03 D.
248. Ветроэнергетика / Под ред.Д. де Рензо: Пер.с англ.; под ред. Я.И.Шефтера. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 272 с.– Текст : непосредственный.
249. Вирченко Н.А. Графики функций /Н.А.Вирченко, И.И.Ляшко, К.И.Швецов // Киев: Наукова думка, 1979. – 320 с. .– Текст : непосредственный.
250. Воскобойник М.Ф., Черников А.И. Техника и приборы СВЧ, М.: Наука и связь. 1982 – 208 с. .– Текст : непосредственный.
251. Выгодский, М.Я. Справочник по высшей математике / М.Я Выгодский. - М.: Наука, 1977. - 372 с. .– Текст : непосредственный.
252. Гавелей Н.П. Распространение радиоволн / Н.П. Гавелей, Л.М. Никитин // М.: 1972. 336 с. .– Текст : непосредственный.
253. Глухов Ю., Козленко В. Выбор эмпирических зависимостей. Наука и жизнь, 1990, № 10, – С.111. .– Текст : непосредственный.
254. ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест — Введ. 2003-06-25. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. .– Текст : непосредственный.
255. Голота, В.И. Кинетика распада озона в реакторе для разложения шин/ В.И. Голота [и др.]//Вопросы атомной науки и техники. – 2010. - №4. - С.204-209. .– Текст : непосредственный.
256. Гольдштейн Л.Д., Зернов, Н.В. Электромагнитные волны. / Л.Д. Гольдштейн, Н.В. Зернов - М.: Сов. радио, 1971. 662 с. .– Текст : непосредственный.
257. ГОСТ 5542-87. Газы горючие природные для промышленности и коммунально-бытового назначения = Natural gases for commercial and domes-

- tic use. Разработан Министерством газовой промышленности .Введен 1988-01-01.-М.: Изд-во стандартов, 2000.– 16 с.– Текст : непосредственный.
258. ГОСТ Р513870-99 Энергосбережение «Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения. Разработан ФГУ Российское агентство энергоэффективности Минтопэнерго России совместно с ВНИЦ СМВ и ВНИСтандарт Госстандарта России. Принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 30.11.1999 – 15 с. Текст : непосредственный.
259. ГОСТ Р51750 -2001 Методика определения энергоемкости при производстве продукции и оказании услуг в технологических энергетических системах. Общие положения = Energy conservation. Method for determination of energy capacity on production output and rendering of services in technological energy systems general principles. Госстандарт РФ М.: 2001 – 19 с. – Текст непосредственный.
260. Грездов Г.И. Теория и применение гибридных моделей. – К.: Наукова думка, 1975. – 271 с.– Текст : непосредственный.
261. Грездов Г.Н. Вопросы теории и применения гибридных вычислительных систем : Автореферат дис. на соискание ученой степени доктора технических наук./ Киев. ин-т инженеров гражд. авиации. - Киев : 1972. - 30 с.– Текст : непосредственный
262. Данилина, Н.А. Численные методы / Н.А. Данилина [и др.]. – М.: Высшая школа, 1986. - 253 с.– Текст : непосредственный.
263. Дещеревский О.А. Моделирование гидродинамики методом решеточных уравнений Больцмана. / О.А. Дещеревский // М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет. - 2015. 15 с.– Текст : непосредственный.
264. Драгин, В.А. Электроозонатор для повышения эффективности сжигания печного топлива в малых котельных АПК: дис. ...канд. техн. наук/ В.А. Драгин; КГАУ. - Краснодар, 2001. – 178 с.– Текст : непосредственный.
265. Дымков М.П. Высшая математика: Математический анализ и дифференциальные уравнения: учебно-практическое пособие/ М.П. Дымков,

- И.Е. Шилкина. - Мн: БГЭУ, 2005. - 189 с. ISBN 985-484-147-2/ – Текст : непосредственный.
266. Еськов Е.К. Поведение медоносных пчел. – М.: Колос, 1981 – 184 с.– Текст : непосредственный.
267. Еськов Е.К., Миронов Г.А. Механизм восприятия пчелой низкочастотных электрических полей / Е.К.Еськов, Г.А.Миронов. – Текст : непосредственный // Зоологический журнал, 1990, т.68, № 5, С.53 – 59.
268. Жеребцов И.П. Основы электроники. –5-е изд. перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр.отд-ние, 1989.–352 с.–ISBN 5-283-04448-3. – Текст : непосредственный.
269. Закржевский Э.Р. Ветро двигатели для механизации животноводческих ферм. / Ж.Р.Закржевский // Гос.изд-во БССР, Редакция сельскохозяйственной литературы, Минск: 1959, – 197 с. – Текст : непосредственный.
270. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов, С.В. Основы теории цепей. / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов // М.: Энергоатомиздат, 1989. 528 с.– Текст : непосредственный.
271. Ивановский Р.И. Теория вероятностей и математическая статистика. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде Mathcad / Р.И. Ивановский. – СПб.:Издательство: БХВ-Петербург, 2008. — 528 с. ISBN 978-5-9775-0199-6. – Текст : непосредственный.
272. Казаков О.Г. Теория горения и взрыва: учебник и практикум : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 280700 "Техносферная безопасность" по программе бакалавриата / [О. Г. Казаков и др.] ; под общ. ред. А. В. Тотая, О. Г. Казакова. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Юрайт, 2013. - 295 с. : ил., табл.; 21 см. - (Бакалавр. Базовый курс).; ISBN 978-5-9916-2414-5. – Текст : непосредственный.
273. Каштанов В.П., Титов В.В., Усков А.Ф. Свинцовые стартерные аккумуляторные батареи. Руководство по эксплуатации М.: МО СССР, 1983. – С.5. – Текст : непосредственный

274. Кириевский Е.В. Расчет устройств адресного опроса датчиков для многоточечных измерительных систем. Новочеркасск: Южно-Российский государственный технический университет. 2013. 17 с. – ISBN 978-5-9997-0080-3. – Текст : непосредственный.
275. Кирилин Н.И. Теория расчета оптимальных систем автоматического управления / Н.И. Кирилин. - М.: Изд-во МГАУ, 1999.– 242 с. – Текст : непосредственный.
276. Киясбейли А.Ш., Перельштейн, М.Е. Вихревые измерительные приборы / А.Ш. Киясбейли, М.Е. Перельштейн - М.: Машиностроение, 1978. 152 с. – Текст : непосредственный.
277. Киясов С.Н. Дифференциальные уравнения - Основы теории, методы решения задач: учебное пособие / С.Н. Киясов, В.В. Шурыгин. – Казань: Казанский федеральный университет, 2011. – 112 с. – Текст : непосредственный
278. Клюев А.С. Настройка систем автоматизации и автоматического регулирования: справочное пособие/ А.С. Клюев [и др.]; под ред. А.С. Клюева. –2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. - 368 с. – ISBN 5-283-01451-9/ – Текст : непосредственный.
279. Ключи к экологии. Под ред. Агесс П. Л. Пер. с фр. : Гидрометеоздат, 1982 – С.96.– Текст : непосредственный.
280. Ковач Р.М. Дозиметрия в исследованиях биологического действия радиоволн. Л.: 1975. – 237 с.– Текст : непосредственный.
281. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы / Г.Корн, Т.Корн; под общей ред. И.Г. Арамановича. – 5-е изд. – М.: Наука,1984. - 832 с. – Текст : непосредственный.
282. Кравченко Т.И. Zig-Bee-модемы ETRX2 компании Telegesis. Беспроводные технологии, 2007. № 2. – С. 31-33. – Текст непосредственный.

283. Краткая медицинская энциклопедия. / Отв. Ред. А.Н. Шабанов. Т. 2. Корь – Ртуть. – М.: Сов. Энциклопедия, 1973. – 600 с. – Текст непосредственный.
284. Кривов С.В. Разработка научных основ электрической сепарации по проводимости. Автореферат диссертации на соиск.уч.степ. доктора технических наук по специальности 05.14.12 – Техника высоких напряжений. М.: Московский энергетический институт. – 2000. – 40 с. – Текст : непосредственный.
285. Криштафович И.А., Криштафович Ю.А. Ионный ветер и его применение URL: <http://www.treeair.com/ion.pdf> (дата обращения: 10.10.2013). – Текст : электронный.
286. Крупкина Т.В. Математическая статистика: курс лекций/ Т. В. Крупкина, А. К. Гречкосеев. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 189 с. – ISBN 978-5-7638-179-2/ – Текст : непосредственный.
287. Кузьмин А.В., Схиртладзе А.Г. Теория систем автоматического управления: учебник / А.В.Кузьмин, А.Г.Схиртладзе. – Старый Оскол: ТНТ, 2017, – 224 с. – SBN 978-5-94178-189-8. – Текст : непосредственный.
288. Кулова Т.Л. Гибкие литий-ионные аккумуляторы нового поколения / Т. Л. Кулова Н.Ф. Никольская – Текст непосредственный // Электрохимическая энергетика - М.: 2009.№ 2 – С.67-70.
289. Лазарев А.И., Нечаев, Е.Е. Состояние и развитие спутниковых систем связи и навигации / А.И. Лазарев, Е.Е. Нечаев. – Текст непосредственный // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации - М.: 2010. №159 – С. 32-43.
290. Лакомкин В.Ю., Смородин С.Н., Громова Е.Н. Гидродинамика и теплообмен в газодисперсных потоках. Учебно-методические указания. Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна. С-П.: 2017. –58 с.– Текст : непосредственный.
291. Лапин А.П., Дружков А.М., Кузнецова К.В. Вихревой метод измерения расхода: история вопроса и направления исследований / А.П. Лапин, А.М.

Дружков, К.В. Кузнецова. – Текст : непосредственный // Челябинск: Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника Южно-Уральский государственный университет. - 2014 №3 – С. 19–28.

292. Лапкин А.П., Альшева, К.В. Анализ и уточнение модели уравнения измерения вихреакустического расходомера / А.П. Лапкин, К.В. Альшева – Текст : непосредственный // Челябинск: Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника, 2017. – С. 42-48.

293. Левитский Н.И. Теория механизмов и машин. Учеб.пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1990. – 592 с. – ISBN 5-02-014188-7. – Текст : непосредственный.

294. Льюис Б. Горение, пламя и взрывы в газах/ Б. Льюис, Г. Эльбе; пер. с англ. под ред. К.И. Щелкина, А.А. Борисова. – 2- изд. – М.: Мир, 1968. – 592 с.– Текст непосредственный.

295. Мосер П. Чего только нет в пыли! // Наука и жизнь. –1988. – № 6, – С.46-51. – Текст : непосредственный.

296. Неймарк Ю.И. Динамические модели теории управления / Ю.И Неймарк, Н.Я. Коган, В.П.Савельев. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 400 с. – Текст : непосредственный.

297. Некрасов А.С., Семикашев В.В. Затраты энергии в российских домашних хозяйствах / А.С.Некрасов, В.В.Семикашев. – Текст : непосредственный // Экономический журнал ВШЭ, 2006, № 3, т.10, С.448...470.

298. Никамин В.А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. – СПб: КОРОНА принт; М.: «Альтекс-А», 2003. 224 с. – ISBN 5-7931-0253-1– Текст : непосредственный.

299. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики: Учеб.для машиностроит. И приборостроит. спец.вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш.шк., 1990. – 607 с.– ISBN 5-06-000695-6. – Текст : непосредственный.

300. Никольский В.В., Никольская, Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн / В.В. Никольский, Т.И. Никольская // - М.: 1989. – 417 с. ISBN 5-02-014033-3. – Текст : непосредственный.
301. Нормов Д.А. Разработка и исследование электроозонатора для повышения эффективности сжигания топлива в котельных АПК: дис. ...канд. техн. наук/ Д.А. Нормов; КГАУ. - Краснодар, 1997. – 154 с. – Текст : непосредственный.
302. Ойстин О. Теория графов / О. Ойстин // Либроком -М.: Наука. - 1980. 336 с.– Текст : непосредственный.
303. Олофинский Н.Ф. Электрические методы обогащения. Изд.4, перераб. и доп., М.: «Недра». 1977, – 579 с.– Текст : непосредственный.
304. Основы практической теории горения: учебное пособие для вузов/ под ред. В.В. Померанцева. – 2-е изд. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с. – Текст : непосредственный.
305. Патент № 109897 Российская Федерация, МПК H05 B 6/10 (2006.01). Индукционное нагревательное устройство: № 2010154572/07; заявл. 31.12.2010; опубл.27.09.2011. Бюл.№ 27 / Коваль В.А., Судник Ю.А., Андреев С.А., Загинайлов В.И.
306. Патент № 119856 Российская Федерация, МПК F24 D3/12 (2006.01). Система отопления жилых и производственных помещений: № 2012110353/12; заявл. 20.03.2012; опубл. 27.08.2012. Бюл. № 24 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Богоявленский В.М., Флегонтов Е.А.
307. Патент № 119857 Российская Федерация, МПК F24 D17/02 (2006.01). Установка для отопления и горячего водоснабжения: № 2012106719/12; заявл. 24.02.2012; опубл. 27.08.2012. Бюл.№ 24 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Ходус Е.В.
308. Патент № 119860 Российская Федерация, МПК F24 H1/00 (2006.01). Отопительный котел: № 2012110351/06; заявл. 20.03.2012; опубл. 27.08.2012. Бюл.№ 24 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А.

309. Патент № 120535 Российская Федерация, МПК Н 05 В6/64 (2006.01).
Установка для СВЧ-обработки: № 2012110352; заявл. 20.03.2012; опубл. 20.09.2012. Бюл. № 26 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Щукина В.Н.
310. Патент № 1311461 Российская Федерация, МПК F24 Н1/06 (2006.01).
Котел для приготовления горячей воды и пара: № 2013107151/06; заявл. 20.02.2013; опубл. 20.08.2013. Бюл. № 23 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А., Гурецкий Н.И.
311. Патент № 131459 Российская Федерация, МПК F24 Н1/00 (2006.01).
Отопительный котел: № 2012153818; заявл. 13.12.2012; опубл. 20.08.2012. Бюл. № 23 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А., Гурецкий Н.И.
312. Патент № 135009 Российская Федерация, МПК F03 D3/04, F03 D3/02 (2006.01). Малообъемный ветродвигатель: № 2013112159/06; заявл. 20.03.2013; опубл. 27.11.2013. Бюл. № 33 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Вагин А.В.
313. Патент № 136860 Российская Федерация, МПК F03 D7/06 (2006.01).
Ветродвигатель: № 2013130270; заявл. 03.07.2013; опубл. 20.01.2014. Бюл. № 2 / Андреев С.А.
314. Патент № 137091 Российская Федерация, МПК F24 Н1/00 (2006.01).
Устройство для нагрева воды: № 2013118676/06; заявл. 24.04.2013; опубл. 27.01.2014. Бюл. № 3. / Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А., Богоявленский В.М.
315. Патент № 137601 Российская Федерация, МПК F24 J2/42, H01 L31/048 (2006.01). Малообъемный преобразователь солнечной энергии в электрическую: № 2013121678/06; заявл. 13.05.2013; опубл. 20.02.2014. Бюл. № 5 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Вагин А.В., Шибаров Д.В.
316. Патент № 138737 Российская Федерация, МПК F24 В5/06 (2006.01).
Отопительно-варочная печь: № 2013141054/06; заявл. 06.09.2013; опубл. 20.03.2014. Бюл. № 8 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А., Бессонов К.Е., Богаченков А.Г.

317. Патент № 140455 Российская Федерация, МПК F24 D3/08 (2006.01). Система автономного обогрева помещений: № 2013147025/12; заявл. 22.10.2013; опубл. 10.05.2014. Бюл.№ 13 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Трушевский С.Н., Флегонтов Е.А.
318. Патент № 140809 Российская Федерация, МПК F24 H1/00 (2006.01). Водогрейный котел: № 2013139515/02; заявл. 27.08.2013; опубл. 20.05.2014. Бюл.№ 14 / Андреев С.А., Петрова Е.А.
319. Патент № 143227 Российская Федерация, МПК E03 B3/00 (2006.01). Устройство для подъема воды: № 2013152074/13; заявл. 25.11.2013; опубл. 20.07.2014. Бюл.№ 20 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Шибаров Д.В.
320. Патент № 144540 Российская Федерация, МПК F24 H1/00 (2006.01). Водогрейный пиролизный котел: № 2013157082/06; заявл. 24.12.2013; опубл. 27.08.2014. Бюл.№ 24 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А., Макаров Е.А.
321. Патент № 144542 Российская Федерация, МПК F03 D7/06 (2006.01). Ветродвигатель со взаимно-перпендикулярными валами: № 2013145580/06; заявл. 11.10.2013; опубл. 27.08.2014. Бюл.№ 24 / Андреев С.А.
322. Патент № 147360 Российская Федерация, МПК G01 F1/075 (2006.01). Устройство для измерения количества потребленной жидкости № 2014116863/28; заявл. 28.04.2014; опубл. 10.11.2014. Бюл.№ 31 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Матвеев А.И.
323. Патент № 147722 Российская Федерация, МПК F24 D17/02 (2006.01). Установка для автономного отопления: № 2014116861/12; заявл. 28.04.2014; опубл. 20.11.2014. Бюл.№ 32 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Ходус Е.В.
324. Патент № 147857 Российская Федерация, МПК F 26 B9/06 (2006.01). Установка для сушки древесины: № 2014112298/06; заявл. 01.04.2014; опубл. 20.11.2014. Бюл.№ 32 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Рудобашта С.П., Семина А.А.
325. Патент № 148721 Российская Федерация, МПК H02 N10/00 (2006.01). Термоэлектрическая система производства энергии: – 2014108716/07; заявл.

07.03.2014; опубл. 10.12.2014. Бюл.№ 34 / Андреев С.А., Ходус Е.В., Ельцов А.В.

326. Патент № 149505 Российская Федерация, МПК F24 D12/02 (2006.01). Автономная отопительная система: № 2014119706/12; заявл. 16.05.2014; опубл. 10.01.2015. Бюл.№ 1 / Андреев С.А. Судник Ю.А., Трушевский С.Н., Флегонтов Е.А.

327. Патент № 152417 Российская Федерация, МПК H02N 10/00 (2006.01). Устройство для преобразования тепловой энергии в электрическую: № 2014129049/07; заявл. 16.07.2014; опубл. 27.05.2015. Бюл.№ 15 / Андреев С.А., Семина А.А.

328. Патент № 155165 Российская Федерация, МПК G01 F1/00 (2006.01). Устройство для измерения расхода жидкости: № 2015100179/28; заявл. 13.01.2015; опубл. 27.09.2015. Бюл.№ 27 / Андреев С.А., Матвеев А.И.

329. Патент № 156079 Российская Федерация, МПК F24 J3/08, F03 G7/04. Устройство для получения электроэнергии: № 2014140412/06; заявл. 07.10.2014; опубл. 27.10.2015. Бюл.№ 30 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Шибаров Д.В.

330. Патент № 170428 Российская Федерация, МПК H05B 6/68 (2006.01). Установка для СВЧ-обработки: № 2016136143/07; заявл. 08.09.2016; опубл. 25.04.2017. Бюл.№ 12 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Столбунов А.А.

331. Патент № 171156 Российская Федерация, МПК A01C 1/06 (2006.01). Устройство для дражирования семян: № 2016136861, заявл.14.09.2016; опубл.23.05.2017. Бюл.№ 15 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Анашин Д.В., Балан А.В.

332. Патент № 171179 Российская Федерация, МПК F26B 9/06 (2006.01), F26 B 3/04 (2006.01). Устройство для сушки древесины: № 2016135287; заявл.31.08.2016; опубл. 23.05.2017. Бюл.№ 15 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Анашин Д.В., Евченко В.Ю.

333. Патент № 175890 Российская Федерация, МПК F24D 12/02 (2006.01), F24J 3/08 (2006.01). Установка для автономного отопления: № 2017125265,

заявл.14.07.2017; опубл. 21.12.2017, Бюл.№ 36 / Андреев С.А., Загинайлов В.И., Судник Ю.А., Иванова Л.Л.

334. Патент № 189080 Российская Федерация, МПК G01N 25//56 (2006.01). Беспроводное устройство для контроля влажности почв: № 2019103316, заявл. 06.02.2019, опубл. 13.05.2019. Бюл.№ 14 / Андреев С.А., Матвеев А.И., Судник Ю.А., Анашин Д.В.

335. Патент № 2497022 Российская Федерация, МПК F03 D3/06, F03 D11/02 (2006.01). Ветродвижитель: № 2497022; заявл. 23.12.2011; опубл. 27.10.2013. Бюл. № 30 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Вагин А.В.

336. Патент № 2502023 Российская Федерация, МПК F24 F7/00 (2006.01). Способ и устройство для осушения воздуха: № 2011152706; заявл. 23.12.2011; опубл. 20.12.2013. Бюл.№ 35 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Нормов Д.А., Федоренко Е.А.

337. Патент № 2535296 Российская Федерация, МПК F24 D3/12, F24 H1/40, F23 D14/20 (2006.01). Устройство для отопления: № 2012151928/06; заявл. 04.12.2012; опубл. 10.12.2014. Бюл.№ 34 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Петрова Е.А., Гурецкий Н.И.

338. Патент № 2561872 Российская Федерация, МПК A61 L9/015 (2006/01). Способ обеззараживания животноводческих помещений от возбудителя псевдомоноза: № 2014108456/15; заявл.04.03.2014; опубл. 10.09.2015. Бюл.№ 25 / Терехов В.И., Нормов Д.А., Судник Ю.А., Андреев С.А., Сердюченко И.В.

339. Патент № 2622695 Российская Федерация, МПК A01G 25/16 (2006.01). Способ управления поливом: № 2016100223; заявл.11.01.2016; опубл. 19.06.2017. Бюл.№ 17 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Матвеев А.И.

340. Патент № 2627546 Российская Федерация, МПК G01F 1/06 (2006.01). Устройство для измерения расхода жидкости: № 2016119238; заявл. 18.05.2016; опубл. 18.08.2017. Бюл.№ 22 / Андреев С.А., Судник Ю.А., Матвеев А.И.

341. Патент № 2632862 Российская Федерация, МПК А01К 47/00 (2006.01), А01К 51/00 (2006.01). Способ борьбы с варроатозом пчел: № 2016130671, заявл. 26.07.2016; опубл. 11.10.2017. Бюл.№ 29 /Андреев С.А., Судник Ю.А., Загинайлов В.И.
342. Разумовский С.Д. Озон и его реакции с органическими веществами / С.Д. Разумовский, Г.Е. Зайков. - М.: Наука, 1974. – 322 с. – Текст : непосредственный.
343. Рупашев А.Р. Ресурсосбережение при производстве растительного сырья / А.Р.Рупашев. Текст : непосредственный //Аграрное решение. – 2011. – №4, С.26–31.
344. Рутчин В.А. Пьезоэлемент как альтернативный источник энергии. Новые технологии – нефтегазовому региону. Материалы Всероссийской с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2014. / В.А. Рутчин. – Текст : непосредственный // Тюмень: Тюменский индустриальный университет. - 2014. – С. 208–211.
345. Савельев Н.И. Теплофизические свойства жидких веществ и растворов /Н.И.Савельев: Справочное пособие по проектированию процессов и аппаратов химической технологии. ФГБОУ «Чувашский государственный университет имени И.Н.Ульянова», Чебоксары: 2016, 34 с.– Текст : непосредственный.
346. Самсонов В. Т. Об изучении на модели явления пылеобразования при падении пылящих материалов / В.Т. Самсонов. Текст : непосредственный // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС, № 6, 1964.
347. Самсонов В.Т. О законе распределения размеров частиц пыли / В.Т.Самсонов. – Текст : непосредственный // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС.-М., 1964.-Вып.3 (29). С.26-39.
348. СанПин 2.1.41.2496-09. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности

систем горячего водоснабжения: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 15 с. – Текст : непосредственный.

349. Сейдагалиев М.К., Генаев, Р.В. Метод генерации электричества с использованием пьезокерамических пластин / М.К. Сейдагалиев, Р.В. Генаев. Текст : непосредственный // Научное сообщество студентов XXI столетия. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ: сб. ст. по мат. XXXVI Междунар. студ. науч.-практ. конф. – Новосибирск: 2015. № 9 - С. 225–229.

350. Сидоренко Б. Продукция компании Atmel для беспроводных сетей IEEE 802.15.4/ ZigBee/6LOWPAN /Б. Сидоренко. – Текст : непосредственный // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес 6. 2009. - С. 70-77.

351. СНиП 2.07.01 – 89. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. – М.: ФГУП ЦПП, 2007. – 56 с. – Текст : непосредственный.

352. СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование. Строительные нормы и правила Российской Федерации. ГОССТРОЙ РОССИИ, 2003. – 54 с. – Текст : непосредственный.

353. СНиП 41-02-2003 Тепловые сети. Государственный комитет РФ по строительству и жилищно-коммунальному комплексу (ГОССТРОЙ РОССИИ), 2003. – 26 с. – Текст : непосредственный.

354. Соколов, Б.А. Устройство и эксплуатация паровых и водогрейных котлов малой и средней мощности / Б.А. Соколов.- М.: Издательский центр "Академия", - 2008. - 64 с. – Текст : непосредственный.

355. Справочник химика / под. ред. Б. П. Никольского. – Л.: «Химия», 1971. - Т.2. - 1168 с. – Текст : непосредственный.

356. Стадницкий Г.В., Экология /Родионов А.И. – Текст : непосредственный //- Учебник для вузов. – М.: Высш. Шк., 1998. – 272 с. – ISBN 5-7215-1073-1/

357. Степанов К.Н. Ионизация в пламени и электрическое поле / К.Н. Степанов. Текст : непосредственный // - М.: Металлургия, 1968. – 312 с.

358. Стрижинский В.М. Теоретическая механика. Краткий курс по полной программе втузов. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980 – 464 с.– Текст : непосредственный.
359. Тащилин Л.Н., .Структурные и кинематические схемы механизмов /Л.Н.Тащилин. Текст : непосредственный // Перспективы науки. 2018. № 8 (107). – С.17...22.
360. Фаворский О.Н. Основы теории космических двигательных установок: учеб. пособие для втузов/ О.Н. Фаворский, В.В. Фишгойт, Е.И. Янтовский; под ред. О.Н. Фаворского. – Текст непосредственный // – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1978. – 384 с.
361. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки / Е.М.Фатеев // ОГИЗ Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, М.:1957.–536 с. – Текст непосредственный.
362. Федеральный закон РФ от 23 ноября 2009г. № 201-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации. 7. – Текст непосредственный.
363. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности / Е.Л. Фейнберг - М.: 1961. 546 с. – Текст непосредственный.
364. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки./ В.П.Харитонов. – Текст : непосредственный // – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.
365. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи / И.В. Шахнович. Текст : непосредственный // М.: Техносфера, 2006. 288 с. – ISBN 5-94836—070-9/
366. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. – 2-е изд., перераб. и доп. М.:Энергоатомиздат, 1983. – 200с.– Текст : непосредственный.
367. Штиллер В. Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика / В. Штиллер. — М.: Мир, 2000. — 176 с. – ISBN 5-03-002969-9. Текст : непосредственный.

368. Юрьев А.Н. Методика расчета максимальной дальности связи, обеспечиваемой системой радиосвязи по земной волне / А.Н. Юрьев. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник №1 –Омск: 2011. – С. 216-221.

Приложения

Содержание приложений

Приложение А Таблицы

№	Наименование таблицы	Страницы
1	Преимущества и недостатки централизованного теплоснабжения	336
2	Содержание операций, реализуемых алгоритмом численного определения оптимального соотношения температуры теплоносителя и рабочей поверхности теплообменных аппаратов	336
3	Полярность заряда пылеобразующих веществ и соединений	339
4	Плотность и масса различных видов и размеров частиц пыли	339
5	Зависимость плотности воздуха от температуры	340
6	Силы, действующие на частицы пыли при их расположении на высоте 0,05 м и разности температур между слоями воздуха 5°C	340
7	Значения силы, обусловленной электрическим полем и необходимой для предотвращения подъема частиц пыли восходящими потоками воздуха	341
8	Потенциалы ионизации газов в составе атмосферного воздуха	342
9	Зависимость амплитуды пламени в имитационной топочной камере от напряжения питания и частоты включения озонатора	343
10	Результаты двухфакторного дисперсионного анализа экспериментальных данных	343
11	Матрица полного факторного эксперимента 2^2 с равномерным дублированием	344
12	Расширенная матрица плана 2^2	344
13	Сопоставление экспериментальных данных и расчетных данных	342
14	Количество ретранслированных информации от каждого ИПУ при двух вариантах построения сети	344
15	Программа моделирования течения жидкости с описанием	345
16	Напряжение на обкладках ионистора в процессе разряда	347
17	Напряжение на обкладках ионистора при укрупненных временных интервалах	349
18	Распределение долей слагаемых энергетического баланса от полной запасенной энергии при различном количестве ионисторов в группе	350
19	Результаты экспериментального исследования распределения поля в пространстве рабочей камеры	350
20	Результаты сравнения экспериментальных и теоретических значений дозы	351
21	Результаты уточненного эксперимента по замерам дозы СВЧ-воздействия на контрольный материал	353
22	Средние экспериментальные и теоретические значения дозы	354

23	Значения дискрет в функции высоты расположения линий уровня	355
24	Значения ординат экстремумов осциллограмм при различных режимах работы СВЧ-генератора	355
25	Амплитуды гармонических составляющих анодного тока магнетрона при нормальном и аварийном режимах работы СВЧ-генератора	356
26	Амплитуды гармонических составляющих при нормальных режиме работы СВЧ-генератора	356
27	Амплитуды гармонических составляющих при аварийном режиме работы СВЧ-генератора	357
28	Расчетные значения выборочных коэффициентов асимметрии и эксцесса	357
29	Статистические параметры и относительное изменение гармонических составляющих	357
30	Результаты экспериментального исследования зависимости температуры магнетрона и напряжения пятой гармонической составляющей от продолжительности работы	358
31	Значения дозы СВЧ-воздействия, получаемой материалом массой m при различных напряжениях U на первичной обмотке повышающего трансформатора	360
32	Значения параметров функции $D = f(m)$ при различных напряжениях на первичной обмотке повышающего трансформатора	360
33	Параметры ветродвигателя с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей	360
34	Значения коэффициентов использования энергии ветра ξ_1 и ξ_2 при разных числах модулей z	360
35	Зависимость расчетных значений критических межосевых расстояний от количества лопастей	361
36	Содержание операций, выполняемых блоками алгоритма	361
37	Содержание операций, выполняемых блоками ускоренного алгоритма	361
38	Значения минимально допустимых межосевых расстояний, полученные в результате компьютерного моделирования	362
39	Значения отклонений средней точки исходной кривой (величины E) от искусственной прямой для аппроксимирующих функций	362
40	Результаты измерений усилий на разрушение оболочки драже при различных частотах вращения рабочего органа	363
41	Масса смеси, не вступившей в процесс образования драже, для образцов с различными усилиями на разрушение	363
42	Обозначения и диапазоны варьирования исследуемых факторов	363
43	Значения уровней факторов и интервалов их варьирования	364
44	Крутое восхождение по плану Бокса-Уилсона	364
45	План поиска оптимальных значений исследуемых факторов методом Бокса-Уилсона	364

46	Сравнительные характеристики теплоносителей	364
47	Стоимость дополнительного оборудования	365
48	Чистый дисконтируемый доход	365
49	Значения отклонений средней точки исходной кривой (величины E) от искусственной прямой для аппроксимирующих функций	365

Приложение Б – Алгоритмы и графики

№	Наименование	Страницы
1	Алгоритм определения оптимального соотношения температуры теплоносителя и рабочей поверхности теплообменных аппаратов	366
2	Динамика нагрева теплоносителя при подведении тепловой энергии в импульсном режиме	366
3	Временная диаграмма последовательности работы элементов отопительной системы с пневматическим устройством управления грунтовыми теплообменниками	367
4	Зависимость электрического сопротивления слоя пыли от температуры	367
5	Динамика изменения концентрации озона при различных условиях его образования и разложения	367
6	Зависимость амплитуды пламени от напряжения питания и частоты включения озонатора	367
7	Зависимость излучаемой мощности передатчика от количества участков связи	367
8	Алгоритм работы фрагмента АСКУВ	368
9	График зависимости процентной доли использованной энергии ионистором от отношения U_{max} и U_{min}	368
10	Кривые разряда ионистор при различных нагрузках	368
11	Зависимости составляющих уравнений энергетического баланса от отношения U_{max}/U_{min}	368
12	Зависимости долей неиспользованной энергии $W_{ост}$ (%) от количества ионисторов в группе при различных значениях U_{min}	368
13	Графики изменения напряжения у потребителей при разряде ионисторов с использованием параметрической стабилизации и динамической коммутации	369
14	Алгоритм машинного исследования математической модели процесса распределения напряженности поля в пространстве рабочей камеры СВЧ-установки	369
15	Зависимость радиуса цилиндра от высоты расположения продукта и допустимого отклонения дозы	369

16	Алгоритм расчета эквинапряженного пространства в рабочей камере	370
17	Графики линий уровня на фиксированных высотах пространства объемного резонатора	370
18	Зависимость напряжения пятой гармонической составляющей от температуры магнетрона при нормальном режиме работы СВЧ-генератора	370
19	Временная диаграмма работы устройства защиты в нормальном режиме	371
20	Временная диаграмма работы устройства защиты в аварийном режиме.	371
21	Зависимость дозы СВЧ-воздействия от массы обрабатываемого материала и напряжения на первичной обмотке повышающего трансформатора	371
22	Зависимости коэффициентов «а» (а) и «б» (б) от напряжения на первичной обмотке повышающего трансформатора	371
23	Номограмма зависимости напряжения на первичной обмотке повышающего трансформатора от массы обрабатываемых материалов и требуемой дозы	372
24	Осциллограммы пятой и седьмой гармонических составляющих при номинальной нагрузке	372
25	Осциллограммы пятой и седьмой гармонических составляющих при максимальной нагрузке	372
26	Осциллограммы пятой и седьмой гармонических составляющих при минимальной нагрузке	372
27	График изменения активной поверхности лопастей	372
28	Номограмма для определения оптимального режима работы ветродвигателя	372
29	Графики функций $P_0 = G(\sin\varphi - \cos\varphi)$ и $P_0 = G(\sin\varphi - \cos\varphi) - G\sin(\varphi - 45^\circ)$	372
30	Силы, действующие на лопасти, при наличии одного противовеса	373
31	Силы, действующие на лопасти, при наличии двух противовесов	373
32	Номограмма для определения параметров противовесов	373
33	Алгоритм компьютерного моделирования процесса вращения лопастей	373
34	Ускоренный алгоритм определения минимально допустимого межосевого расстояния	373
35	Зависимость $a = f(n)$ для диапазона $2 \leq n \leq 25$	374
36	Теоретическая линия регрессии на корреляционном поле с экспериментальными данными	374

Приложение В – Фотографии, функциональные и принципиальные схемы

№	Наименование	Страницы
1	Схема расположения теплотрасс	375
2	Примеры выполнения конвективной системы отопления	375

3	Функциональная схема отопительной системы с пневматическим устройством управления грунтовыми теплообменниками	375
4	Функциональная схема отопительной системы с электронным устройством управления грунтовыми теплообменниками	375
5	Функциональная схема отопительной системы с гибким алгоритмом управления грунтовыми теплообменниками	376
6	Функциональная схема экспериментальной установки	376
7	Фотография усовершенствованной экспериментальной установки	376
8	Траектории прохождения сигнала при организации связи известным способом	377
9	Траектории прохождения сигнала при организации связи предложенным способом	377
10	Варианты самоорганизации сети	377
11	Лабораторный стенд для исследования параметров вихревой дорожки Кармана	377
12	Схема лабораторного стенда для исследования параметров вихревой дорожки Кармана	377
13	Эскиз вертикальной антенны с заземлением	378
14	Эквивалентная схема антенны с удлиняющей катушкой индуктивности	378
15	Принципиальная электрическая схема блока автономного питания ИПУ	378
16	Схема замещения цепи разряда ионистора	378
17	Схемы соединения ионисторов при динамической коммутации	378
18	Схема контактного аналога динамической коммутации ионисторов	378
19	Функциональная схема системы управления поливом	379
20	Функциональная схема беспроводного устройства для контроля влажности почвы	379
21	Расположение исследуемых точек в пространстве рабочей камеры	379
22	Принципиальная электрическая схема СВЧ-генератора КБН-82	380
23	Функциональная схема микроволновой установки с защитой по уровню низкочастотного излучения	380
24	Функциональная схема микроволновой установки с устройством защиты на эффекте ионизации газа	380
25	Принципиальная электрическая схема микроволновой установки с устройством защиты на эффекте ионизации газа	380
26	Принципиальная электрическая схема микроволновой установки с устройством защиты на емкостном принципе	381
27	Временная диаграмма работы микроволновой установки для при нормальном (а) и аварийном (б) режимах	381

28	Функциональная схема микроволновой установки с устройством регулирования режимами работы СВЧ-генератора	381
29	Функциональная схема переоборудованной микроволновой установки периодического действия	382
30	Принципиальная электрическая схема переоборудованной микроволновой установки периодического действия	382
31	Расположение лопасти ветродвигателя в пространстве	382
32	Изображение лопасти в плане (на плоскости YOZ)	382
33	Общие виды ветродвигателей со взаимно-перпендикулярными валами: а – по заявке Великобритании № 2196699, б – по заявке Польши № 265323	382
34	Общий вид усовершенствованного ветродвигателя	383
35	Общий вид ветродвигателя с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей и уравнивающей системой	383
36	План размещения лопастей при повороте на угол ωt	383
37	Расположение упругой пластинки	383
38	Оптимальное расположение многолопастных элементов	383
39	Схема размещения заградительного экрана	383
40	Схематичные представления лопастей вращающимися векторами	383
41	Функциональная схема адсорбционного осушителя воздуха с озон-воздушным сушильным агентом	384
42	Экспериментальный дражиратор	384
43	Принципиальная электрическая схема регулятора	384
44	Общий вид регулятора частоты вращения рабочего органа	384
45	К оценке относительных размеров стального цилиндрического маховика	385
46	Зависимость преобразованной мощности от диаметра труб и высоты подъема воды	385

Приложение Г – Документы

№	Наименование	Страницы
1	Акт внедрения результатов НИР при проектировании системы обогрева теннисного корта	386
2	Акт внедрения результатов НИР по совершенствованию средств контроля количества потребленной жидкости и беспроводному контролю влажности почвы	387
3	Акт внедрения результатов НИР по двумерному моделированию течения жидкости через трубопроводу с препятствием	388

4	Акт внедрения результатов НИР проектным отделом ООО «ТехноПромСервис» о принятии результатов экспериментально-теоретических исследований воздействия озона на горение природного газа	389
---	---	-----

Приложение А – Таблицы

Таблица 1 – Преимущества и недостатки централизованного теплоснабжения

Показатель	Средства передачи теплоты		Средства передачи энергоресурсов			
	Теплосеть		Газопровод	Электрическая сеть	Автомобильный транспорт	
	Вода	Пар			Твердое топливо (уголь, дрова, торф, пеллеты)	Жидкое топливо (дизельное топливо, печное топливо, мазут)
Капитальные затраты	–	–	–	+	+	+
Эксплуатационные затраты	+	–	–	+	–	–
Пожароопасность	+	+	–	+	+	+
Надежность	+	+	+	+	–	+
Безопасность обслуживания	+	–	–	–	+	+
Охрана окружающей среды	+	+	+	+	–	–

* «+» – преимущество, «–» – недостаток.

Таблица 2. Содержание операций, реализуемых алгоритмом численного определения оптимального соотношения температуры теплоносителя и рабочей поверхности теплообменных аппаратов

№ блока алгоритма	Перечень вводимых начальных данных
2	F_h – отапливаемая площадь помещения, m^2 ; β_h – коэффициент, учитывающий дополнительное теплотребление системой отопления; этот коэффициент связан с дискретностью отопительного потока и дополнительными теплотерями через части стен, на которых установлены радиаторы отопления, теплотери трубопроводов, проходящими через неотапливаемые помещения (для большинства объектов АПК при размерном коэффициенте $\chi_1=0,024$ принимают $\beta_h=1,1$); ν – коэффициент, учитывающий способность стен аккумулировать или отдавать теплоту при периодическом отоплении помещения (для расчета системы отопления объектов АПК $\nu=0,85$); D_d – количество градусо-суток отопительного сезона, определяемый исходя из

температуры зоны дома (обычно для оперативного определения D_d предлагается использовать справочные данные, из которых видно, что эта величина находится в диапазоне от 2250 °С·сутки до 3750 °С·сутки);

F_{Σ} – общая внутренняя площадь стен, пола и потолка отапливаемого помещения, м²;

ξ – коэффициент, учитывающий дополнительные теплотери, связанные с ориентацией помещения относительно сторон света, наличием угловых помещений, поступлением холодного воздуха через вход (для производственных помещений обычно принимается, что $\xi=1,11$);

$F_{нч}, F_{сч}, F_{д}, F_{лк}, F_{ц}$ – площадь соответственно стен (непрозрачных частей), светопрозрачных частей (окон, фонарей), внешних дверей и ворот, перекрытий (чердачных перекрытий), цокольных перекрытий, м²;

χ_2 – размерный коэффициент, $\chi_2=0,278$;

c – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К);

U_v – коэффициент снижения объема воздуха в сооружении, учитывающий наличие внутренних ограждений, $U_v=0,85$;

V_h – объем отапливаемого помещения, м³;

η – коэффициент влияния встречного теплового потока в огражденных конструкциях; (η принимается 0,7 – для стыков панелей стен, а также многостворочных окон дома; 0,8 – для двустворочных окон и балконных дверей; 1,0 – для одностворочных окон и балконных дверей; при этом коэффициент η принимается за наибольшим значением, единым по всему помещению);

t_e – расчетная температура внутреннего воздуха помещения, °С;

$t_{он з}$ – средняя температура внешнего воздуха за отопительный период, °С; $\xi_{\phi}, \xi_{з л}$ – коэффициенты, учитывающие затенение светового прореза относительно окон и зенитных фонарей непрозрачными элементами заполнения;

$\varepsilon_{в}, \varepsilon_{з л}$ – коэффициенты относительного проникновения солнечной радиации для светопрозрачных заполнений окон и зенитных фонарей, приводимые в паспортных данных для светопрозрачных конструкций; мансардных окон (при этом, если наклон светопрозрачных элементов относительно горизонта составляет 45 и более градусов, их следует считать вертикальными окнами, а при наклоне 45 и менее градусов – зенитными фонарями);

$F_{C\phi}, F_B, F_{Юз}, F_3$ – площади светопрозрачных фасадов помещения, ориентированные по сторонами света, м²;

$F_{сн \phi}$ – площадь световых зенитных фонарей помещения м²;

$I_{C\phi}, I_B, I_{Юз}, I_3$ – средние величины солнечной радиации за отопительный период, на-

	<p>правленные на вертикальную поверхность при условии облачности по сторонам света соответственно (для промежуточных ориентиров фасада помещения, отличающихся от направлений на Север, Восток, Юг и Запад);</p> <p>I_z – средняя величина солнечной радиации за отопительный период, направленная на горизонтальную поверхность из условий пасмурности;</p> <p>K – коэффициент теплопередачи материала отопительных аппаратов, $Вт/м^2$;</p> <p>ΔT – температурный напор, °С;</p> <p>T_n – средняя температура теплоносителя на входе, °С;</p> <p>T_k – средняя температура теплоносителя на выходе, °С;</p> <p>$T_{вн}$ – требуемая температура внутри помещения, °С;</p>
3	<p>$q_{\text{помещения}}$ – удельных теплотерь за отопительный период, $кВт \cdot \text{час}/м^2$;</p> <p>$Q_{\text{год}}$ - расхода тепловой энергии на отопление помещения на протяжении отопительного периода, $кВт/м^2$;</p> <p>Q_k– общих теплотерь, $кВт \cdot \text{час}/м^2$;</p> <p>$K_{\text{пом}}$ – общего коэффициента теплопередачи помещения;</p> <p>$k_{\Sigma пр}$ - приведенного коэффициента теплопередачи теплоизоляционной оболочки помещения;</p> <p>$k_{\text{инф}}$ – условного коэффициента теплопередачи ограждающих конструкций дома</p> <p>γ_3 – средней плотности воздуха, определяющий инфольтрацию и вентиляцию помещения, $кг/м^3$;</p> <p>Q_s – тепловых поступлений сквозь окна от солнечной радиации на протяжении отопляемого периода для четырех фасадов объекта, ориентированных по сторонам света;</p>

Таблица 3 – Полярность заряда пылеобразующих веществ и соединений

Положительный заряд	Отрицательный заряд
Хлорид натрия	Цинк
Уголь	Окись цинка
Туман концентрированных кислот	Окись свинца
Сера	Окись железа
Песок	Мука
Мрамор	Кварцевый песок
Мелкие частицы почвы	Кальций
Крахмал	Декстрин
Апатит	

Таблица 4 – Плотность и масса различных видов и размеров частиц пыли

Вещество	Диаметр частиц пыли, мкм	Плотность, г/см ³	Масса, кг
SiO ₂ (оксид кремния)	0,5	2,33	$1,525 \times 10^{-16}$
	75		$5,357 \times 10^{-10}$
	200		$9,763 \times 10^{-9}$
Fe ₂ O ₃ (оксид железа)	0,5	5,242	$3,432 \times 10^{-16}$
	75		$1,205 \times 10^{-9}$
	200		$2,196 \times 10^{-8}$
CaO (известь)	0,5	3,30	$2,161 \times 10^{-16}$
	75		$7,587 \times 10^{-10}$
	200		$1,383 \times 10^{-8}$
MgO (жженая магнезия)	0,5	3,58	$2,344 \times 10^{-16}$
	75		$8,231 \times 10^{-10}$
	200		$1,500 \times 10^{-8}$
Al ₂ O ₃ (глинозем)	0,5	0,96	$6,286 \times 10^{-17}$
	75		$2,207 \times 10^{-10}$
	200		$4,022 \times 10^{-9}$
Дерево	0,5	0,80	$5,238 \times 10^{-17}$
	75		$1,839 \times 10^{-10}$
	200		$3,352 \times 10^{-9}$
Хлопок	0,5	0,14	$9,166 \times 10^{-18}$
	75		$3,219 \times 10^{-11}$
	200		$5,866 \times 10^{-10}$
Бумага	0,5	0,20	$1,309 \times 10^{-17}$
	75		$4,598 \times 10^{-11}$
	200		$8,380 \times 10^{-10}$
Штукатурка	0,5	1,80	$1,178 \times 10^{-16}$
	75		$4,138 \times 10^{-10}$
	200		$7,542 \times 10^{-9}$
Волосы, шерсть	0,5	1,30	$8,511 \times 10^{-17}$
	75		$2,989 \times 10^{-10}$
	200		$5,447 \times 10^{-9}$
Сухая кожа	0,5	0,86	$5,630 \times 10^{-17}$
	75		$1,977 \times 10^{-10}$

	200		$3,603 \times 10^{-9}$
--	-----	--	------------------------

Таблица 5 – Зависимость плотности воздуха от температуры

Температура, °С	+5	+10	+15
Плотность воздуха, кг/м ³	1,2690	1,2466	1,2250
Температура, °С	+20	+25	+30
Плотность воздуха, кг/м ³	1,2041	1,1839	1,1644

Таблица 6 – Силы, действующие на частицы пыли при их расположении на высоте 0,05 м и разности температур между слоями воздуха 5°С

Вещество	Радиус частиц пыли, м	Плотность пыли, кг/м ³	Сила тяжести, Н	Подъемная сила, Н	Сила воздействия электрического поля, Н
SiO ₂ (оксид кремния)	$0,25 \cdot 10^{-6}$	2330	1,4952E-15	6,11E-14	5,96E-14
	$38 \cdot 10^{-6}$		5,25087E-09	1,41E-09	-3,84E-09
	$100 \cdot 10^{-6}$		9,56931E-08	9,78E-09	-8,59E-08
Fe ₂ O ₃ (оксид железа)	$0,25 \cdot 10^{-6}$	5242	3,36389E-15	6,11E-14	5,78E-14
	$38 \cdot 10^{-6}$		1,18133E-08	1,41E-09	-1,04E-08
	$100 \cdot 10^{-6}$		2,15289E-07	9,78E-09	-2,06E-07
CaO (известь)	$0,25 \cdot 10^{-6}$	3300	2,11767E-15	6,11E-14	5,90E-14
	$38 \cdot 10^{-6}$		7,43686E-09	1,41E-09	-6,02E-09
	$100 \cdot 10^{-6}$		1,35531E-07	9,78E-09	-1,26E-07
MgO (жженая магнезия)	$0,25 \cdot 10^{-6}$	3580	2,29735E-15	6,11E-14	5,88E-14
	$38 \cdot 10^{-6}$		8,06786E-09	1,41E-09	-6,66E-09
	$100 \cdot 10^{-6}$		1,47031E-07	9,78E-09	-1,37E-07
Al ₂ O ₃ (глинозем)	$0,25 \cdot 10^{-6}$	960	6,1605E-16	6,11E-14	6,05E-14
	$38 \cdot 10^{-6}$		2,16345E-09	1,41E-09	-7,51E-10
	$100 \cdot 10^{-6}$		3,94272E-08	9,78E-09	-2,96E-08
Дерево	$0,25 \cdot 10^{-6}$	800	5,13375E-16	6,11E-14	6,06E-14
	$38 \cdot 10^{-6}$		1,80287E-09	1,41E-09	-3,91E-10
	$100 \cdot 10^{-6}$		3,2856E-08	9,78E-09	-2,31E-08
Хлопок	$0,25 \cdot 10^{-6}$	140	8,98406E-17	6,11E-14	6,10E-14
	$38 \cdot 10^{-6}$		3,15503E-10	1,41E-09	1,10E-09
	$100 \cdot 10^{-6}$		5,7498E-09	9,78E-09	4,03E-09
Бумага	$0,25 \cdot 10^{-6}$	200	1,28344E-16	6,11E-14	6,10E-14

	$38 \cdot 10^{-6}$		4,50719E-10	1,41E-09	9,62E-10
	$100 \cdot 10^{-6}$		8,214E-09	9,78E-09	1,57E-09
Штукатурка	$0,25 \cdot 10^{-6}$	1800	1,15509E-15	6,11E-14	6,00E-14
	$38 \cdot 10^{-6}$		4,05647E-09	1,41E-09	-2,64E-09
	$100 \cdot 10^{-6}$		7,3926E-08	9,78E-09	-6,41E-08
Волосы, шерсть	$0,25 \cdot 10^{-6}$	1300	8,34234E-16	6,11E-14	6,03E-14
	$38 \cdot 10^{-6}$		2,92967E-09	1,41E-09	-1,52E-09
	$100 \cdot 10^{-6}$		5,3391E-08	9,78E-09	-4,36E-08
Сухая кожа	$0,25 \cdot 10^{-6}$	860	5,51878E-16	6,11E-14	6,06E-14
	$38 \cdot 10^{-6}$		1,93809E-09	1,41E-09	-5,26E-10
	$100 \cdot 10^{-6}$		3,53202E-08	9,78E-09	-2,55E-08

Таблица 7 – Значения силы, обусловленной электрическим полем и необходимой для предотвращения подъема частиц пыли восходящими потоками воздуха

$F_{эл.}$		$h, м$								
$R, м$	$\rho, кг/м^3$	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
3E-07	2330	-2,73E-16	9,50E-16	2,17E-15	3,39E-15	4,62E-15	5,84E-15	7,06E-15	8,28E-15	9,51E-15
4E-05		-5,22E-09	-5,19E-09	-5,17E-09	-5,14E-09	-5,11E-09	-5,08E-09	-5,05E-09	-5,02E-09	-5,00E-09
0,0001		-9,55E-08	-9,53E-08	-9,51E-08	-9,49E-08	-9,47E-08	-9,45E-08	-9,43E-08	-9,41E-08	-9,39E-08
3E-07	5242	-2,14E-15	-9,19E-16	3,04E-16	1,53E-15	2,75E-15	3,97E-15	5,19E-15	6,42E-15	7,64E-15
4E-05		-1,18E-08	-1,18E-08	-1,17E-08	-1,17E-08	-1,17E-08	-1,16E-08	-1,16E-08	-1,16E-08	-1,16E-08
0,0001		-2,15E-07	-2,15E-07	-2,15E-07	-2,15E-07	-2,14E-07	-2,14E-07	-2,14E-07	-2,14E-07	-2,14E-07
3E-07	3300	-8,95E-16	3,27E-16	1,55E-15	2,77E-15	3,99E-15	5,22E-15	6,44E-15	7,66E-15	8,88E-15
4E-05		-7,41E-09	-7,38E-09	-7,35E-09	-7,32E-09	-7,30E-09	-7,27E-09	-7,24E-09	-7,21E-09	-7,18E-09
0,0001		-1,35E-07	-1,35E-07	-1,35E-07	-1,35E-07	-1,35E-07	-1,34E-07	-1,34E-07	-1,34E-07	-1,34E-07
3E-07	3580	-1,07E-15	1,48E-16	1,37E-15	2,59E-15	3,82E-15	5,04E-15	6,26E-15	7,48E-15	8,71E-15
4E-05		-8,04E-09	-8,01E-09	-7,98E-09	-7,95E-09	-7,93E-09	-7,90E-09	-7,87E-09	-7,84E-09	-7,81E-09
0,0001		-1,47E-07	-1,47E-07	-1,46E-07	-1,46E-07	-1,46E-07	-1,46E-07	-1,46E-07	-1,45E-07	-1,45E-07
3E-07	960	6,06E-16	1,83E-15	3,05E-15	4,27E-15	5,50E-15	6,72E-15	7,94E-15	9,16E-15	1,04E-14
4E-05		-2,14E-09	-2,11E-09	-2,08E-09	-2,05E-09	-2,02E-09	-1,99E-09	-1,97E-09	-1,94E-09	-1,91E-09
0,0001		-3,92E-08	-3,90E-08	-3,88E-08	-3,86E-08	-3,84E-08	-3,83E-08	-3,81E-08	-3,79E-08	-3,77E-08
3E-07	800	7,09E-16	1,93E-15	3,15E-15	4,38E-15	5,60E-15	6,82E-15	8,04E-15	9,27E-15	1,05E-14
4E-05		-1,77E-09	-1,75E-09	-1,72E-09	-1,69E-09	-1,66E-09	-1,63E-09	-1,61E-09	-1,58E-09	-1,55E-09
0,0001		-3,27E-08	-3,25E-08	-3,23E-08	-3,21E-08	-3,19E-08	-3,17E-08	-3,15E-08	-3,13E-08	-3,11E-08
3E-07	140	1,13E-15	2,36E-15	3,58E-15	4,80E-15	6,02E-15	7,25E-15	8,47E-15	9,69E-15	1,09E-14
4E-05		-2,87E-10	-2,59E-10	-2,31E-10	-2,03E-10	-1,74E-10	-1,46E-10	-1,18E-10	-8,95E-11	-6,13E-11
0,0001		-5,55E-09	-5,36E-09	-5,16E-09	-4,97E-09	-4,77E-09	-4,58E-09	-4,38E-09	-4,19E-09	-3,99E-09
3E-07	200	1,09E-15	2,32E-15	3,54E-15	4,76E-15	5,98E-15	7,21E-15	8,43E-15	9,65E-15	1,09E-14
4E-05		-4,22E-10	-3,94E-10	-3,66E-10	-3,38E-10	-3,09E-10	-2,81E-10	-2,53E-10	-2,25E-10	-1,97E-10
0,0001		-8,02E-09	-7,82E-09	-7,63E-09	-7,43E-09	-7,24E-09	-7,04E-09	-6,84E-09	-6,65E-09	-6,45E-09
3E-07	1800	6,74E-17	1,29E-15	2,51E-15	3,73E-15	4,96E-15	6,18E-15	7,40E-15	8,62E-15	9,85E-15
4E-05		-4,03E-09	-4,00E-09	-3,97E-09	-3,94E-09	-3,92E-09	-3,89E-09	-3,86E-09	-3,83E-09	-3,80E-09
0,0001		-7,37E-08	-7,35E-08	-7,33E-08	-7,31E-08	-7,29E-08	-7,28E-08	-7,26E-08	-7,24E-08	-7,22E-08
3E-07	1300	3,88E-16	1,61E-15	2,83E-15	4,06E-15	5,28E-15	6,50E-15	7,72E-15	8,95E-15	1,02E-14
4E-05		-2,90E-09	-2,87E-09	-2,84E-09	-2,82E-09	-2,79E-09	-2,76E-09	-2,73E-09	-2,70E-09	-2,68E-09
0,0001		-5,32E-08	-5,30E-08	-5,28E-08	-5,26E-08	-5,24E-08	-5,22E-08	-5,20E-08	-5,18E-08	-5,16E-08

3E-07	860	6,71E-16	1,89E-15	3,12E-15	4,34E-15	5,56E-15	6,78E-15	8,01E-15	9,23E-15	1,05E-14
4E-05		-1,91E-09	-1,88E-09	-1,85E-09	-1,83E-09	-1,80E-09	-1,77E-09	-1,74E-09	-1,71E-09	-1,68E-09
$F_{эл.}$		$h, м$								
R	$\rho, кг/м^3$	0,010	0,020	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,090
3E-07	2330	1,07E-14	2,30E-14	3,52E-14	4,74E-14	5,96E-14	7,19E-14	8,41E-14	9,63E-14	1,09E-13
4E-05		-4,97E-09	-4,69E-09	-4,40E-09	-4,12E-09	-3,84E-09	-3,56E-09	-3,27E-09	-2,99E-09	-2,71E-09
0,0001		-9,37E-08	-9,18E-08	-8,98E-08	-8,79E-08	-8,59E-08	-8,40E-08	-8,20E-08	-8,00E-08	-7,81E-08
3E-07	5242	8,86E-15	2,11E-14	3,33E-14	4,55E-14	5,78E-14	7,00E-14	8,22E-14	9,44E-14	1,07E-13
4E-05		-1,15E-08	-1,12E-08	-1,10E-08	-1,07E-08	-1,04E-08	-1,01E-08	-9,84E-09	-9,55E-09	-9,27E-09
0,0001		-2,13E-07	-2,11E-07	-2,09E-07	-2,07E-07	-2,06E-07	-2,04E-07	-2,02E-07	-2,00E-07	-1,98E-07
3E-07	3300	1,01E-14	2,23E-14	3,46E-14	4,68E-14	5,90E-14	7,12E-14	8,35E-14	9,57E-14	1,08E-13
4E-05		-7,15E-09	-6,87E-09	-6,59E-09	-6,31E-09	-6,02E-09	-5,74E-09	-5,46E-09	-5,18E-09	-4,89E-09
0,0001		-1,34E-07	-1,32E-07	-1,30E-07	-1,28E-07	-1,26E-07	-1,24E-07	-1,22E-07	-1,20E-07	-1,18E-07
3E-07	3580	9,93E-15	2,22E-14	3,44E-14	4,66E-14	5,88E-14	7,11E-14	8,33E-14	9,55E-14	1,08E-13
4E-05		-7,79E-09	-7,50E-09	-7,22E-09	-6,94E-09	-6,66E-09	-6,37E-09	-6,09E-09	-5,81E-09	-5,53E-09
0,0001		-1,45E-07	-1,43E-07	-1,41E-07	-1,39E-07	-1,37E-07	-1,35E-07	-1,33E-07	-1,31E-07	-1,29E-07
3E-07	960	1,16E-14	2,38E-14	3,61E-14	4,83E-14	6,05E-14	7,27E-14	8,50E-14	9,72E-14	1,09E-13
4E-05		-1,88E-09	-1,60E-09	-1,32E-09	-1,03E-09	-7,51E-10	-4,69E-10	-1,86E-10	9,61E-11	3,79E-10
0,0001		-3,75E-08	-3,55E-08	-3,36E-08	-3,16E-08	-2,96E-08	-2,77E-08	-2,57E-08	-2,38E-08	-2,18E-08
3E-07	800	1,17E-14	2,39E-14	3,62E-14	4,84E-14	6,06E-14	7,28E-14	8,51E-14	9,73E-14	1,10E-13
4E-05		-1,52E-09	-1,24E-09	-9,56E-10	-6,73E-10	-3,91E-10	-1,08E-10	1,74E-10	4,57E-10	7,39E-10
0,0001		-3,09E-08	-2,89E-08	-2,70E-08	-2,50E-08	-2,31E-08	-2,11E-08	-1,92E-08	-1,72E-08	-1,53E-08
3E-07	140	1,21E-14	2,44E-14	3,66E-14	4,88E-14	6,10E-14	7,33E-14	8,55E-14	9,77E-14	1,10E-13
4E-05		-3,31E-11	2,49E-10	5,32E-10	8,14E-10	1,10E-09	1,38E-09	1,66E-09	1,94E-09	2,23E-09
0,0001		-3,79E-09	-1,84E-09	1,18E-10	2,07E-09	4,03E-09	5,99E-09	7,94E-09	9,90E-09	1,19E-08
3E-07	200	1,21E-14	2,43E-14	3,65E-14	4,88E-14	6,10E-14	7,32E-14	8,54E-14	9,77E-14	1,10E-13
4E-05		-1,68E-10	1,14E-10	3,97E-10	6,79E-10	9,62E-10	1,24E-09	1,53E-09	1,81E-09	2,09E-09
0,0001		-6,26E-09	-4,30E-09	-2,35E-09	-3,90E-10	1,57E-09	3,52E-09	5,48E-09	7,43E-09	9,39E-09
3E-07	1800	1,11E-14	2,33E-14	3,55E-14	4,77E-14	6,00E-14	7,22E-14	8,44E-14	9,66E-14	1,09E-13
4E-05		-3,77E-09	-3,49E-09	-3,21E-09	-2,93E-09	-2,64E-09	-2,36E-09	-2,08E-09	-1,80E-09	-1,51E-09
0,0001		-7,20E-08	-7,00E-08	-6,81E-08	-6,61E-08	-6,41E-08	-6,22E-08	-6,02E-08	-5,83E-08	-5,63E-08
3E-07	1300	1,14E-14	2,36E-14	3,58E-14	4,81E-14	6,03E-14	7,25E-14	8,47E-14	9,70E-14	1,09E-13
4E-05		-2,65E-09	-2,36E-09	-2,08E-09	-1,80E-09	-1,52E-09	-1,23E-09	-9,53E-10	-6,70E-10	-3,88E-10
0,0001		-5,14E-08	-4,95E-08	-4,75E-08	-4,56E-08	-4,36E-08	-4,17E-08	-3,97E-08	-3,77E-08	-3,58E-08
3E-07	860	1,17E-14	2,39E-14	3,61E-14	4,83E-14	6,06E-14	7,28E-14	8,50E-14	9,72E-14	1,09E-13
4E-05		-1,66E-09	-1,37E-09	-1,09E-09	-8,08E-10	-5,26E-10	-2,43E-10	3,90E-11	3,21E-10	6,04E-10
0,0001		-3,34E-08	-3,14E-08	-2,95E-08	-2,75E-08	-2,55E-08	-2,36E-08	-2,16E-08	-1,97E-08	-1,77E-08

Таблица 8 – Потенциалы ионизации газов в составе атмосферного воздуха

Газ	Потенциал ионизации (В)	Газ	Потенциал ионизации (В)
Ar	15,8	SO ₂	13,1
N ₂	15,6	H ₂ O	12,6
H ₂	15,4	O ₂	12,5
CO ₂	14,4	NO ₂	11,0
CO	14,1	NO	9,5
		Озон O ₃	12,1

Таблица 9 – Зависимость амплитуды пламени в имитационной топочной камере от напряжения питания и частоты включения озонатора

Напряжение питания озонатора, В	Частота включения озонатора, Гц	Амплитуда пламени, см, (Y)			
		1-я повт.	2-я повт.	3-я повт.	Среднее
(X1)	(X2)				
200	0	1,7	1,3	1,5	1,5
210	0	1,8	1,8	2,4	2,0
220	0	1,9	2,2	1,9	2,0
230	0	3,0	3,3	2,5	2,9
200	0,5	4,2	3,9	3,9	4,0
210	0,5	5,3	5,5	5,7	5,5
220	0,5	6,2	6,4	5,4	6,0
230	0,5	8,2	7,8	8,0	8,0
200	1,0	5,1	5,5	5,3	5,3
210	1,0	5,5	5,9	6,0	5,8
220	1,0	6,4	7,4	7,6	6,0
230	1,0	8,7	8,1	8,7	8,5
200	2,0	3,5	3,5	3,5	3,5
210	2,0	3,6	3,2	3,7	3,5
220	2,0	4,4	4,4	4,7	4,5
230	2,0	5,3	5,2	4,5	5,0

Таблица 10 – Результаты двухфакторного дисперсионного анализа экспериментальных данных

Напряжение питания озонатора, В	Частота включения озонатора, Гц	Амплитуда пламени, см, (Y)			
		1-я повт.	2-я повт.	3-я повт.	Среднее
(X1)	(X2)				
200	0	1,7	1,3	1,5	1,5
210	0	1,8	1,8	2,4	2,0
220	0	1,9	2,2	1,9	2,0
230	0	3,0	3,3	2,5	2,9
200	0,5	4,2	3,9	3,9	4,0
210	0,5	5,3	5,5	5,7	5,5
220	0,5	6,2	6,4	5,4	6,0
230	0,5	8,2	7,8	8,0	8,0
200	1,0	5,1	5,5	5,3	5,3
210	1,0	5,5	5,9	6,0	5,8
220	1,0	6,4	7,4	7,6	6,0
230	1,0	8,7	8,1	8,7	8,5
200	2,0	3,5	3,5	3,5	3,5
210	2,0	3,6	3,2	3,7	3,5
220	2,0	4,4	4,4	4,7	4,5
230	2,0	5,3	5,2	4,5	5,0

Таблица 11 – Матрица полного факторного эксперимента 22 с равномерным дублированием

Варьируемый фактор	Натуральные значения факторов (фактические)		Значение y_{iu} (амплитуда пламени, см)		
	x_1 (напряжение, В)	x_2 (частота, Гц)			
Основной уровень, X_{i0}	220	1			
Интервал варьирования, Dx_i	10	1			
Верхний уровень, $x_{i(max)} (x_i=+1)$	230	2			
Нижний уровень, $x_{i(min)} (x_i=-1)$	210	0			
№ опыта, u	Кодированные значения факторов и соответствующие им (в скобках) натуральные значения		Номер дубля		
	x_1 (напряжение, В)	x_2 (частота, Гц)	1	2	3
$u=1$	-1(210)	-1(0)	1,8	1,8	2,4
$u=2$	+1(230)	-1(0)	3	3,3	2,5
$u=3$	-1(210)	+1(2)	3,6	3,2	3,7
$u=4$	+1(230)	+1(2)	5,3	5,2	4,5

Таблица 12 – Расширенная матрица плана 22

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	$\bar{y}_u, \text{ср}$
1	+1	-1	-1	+1	2,0
2	+1	+1	-1	-1	2,9
3	+1	-1	+1	-1	3,5
4	+1	+1	+1	+1	5,0

Таблица 13 – Сопоставление экспериментальных данных и расчетных данных

№ опыта, n	$\bar{y}_{u\text{экспер.}}$	$\bar{y}_{u\text{расч.}}$	$ \Delta y = \bar{y}_{u\text{расч.}} - \bar{y}_{u\text{экспер.}} $	$\Delta y^2 = (\bar{y}_{u\text{расч.}} - \bar{y}_{u\text{экспер.}})^2$
1	2	1,85	-0,15	0,023
2	2,9	3,05	0,15	0,023
3	3,5	3,65	0,15	0,023
4	5	4,85	-0,15	0,023

Таблица 14 – Количество ретранслирований информации от каждого ИПУ при двух вариантах построения сети

ИПУ	Вариант А	Вариант Б
2	1	1
3	2	2
4	10	1
5	9	2
6	8	2
7	7	4
8	6	4
9	5	3
10	4	3
11	3	2
12	2	1
Всего	57	25

Таблица 15 – Программа моделирования течения жидкости с описанием

Блоки программы с кодом	Краткое описание
1-18 Блок инициализации	
1 %matplotlibnbagg	
2 import xlrd, xlwt	Библиотеки для работы с таблицами Excel
3 import numpy	Библиотека для работы с многомерными массивами
4 import matplotlib.pyplot, matplotlib.animation	Библиотеки для работы с анимацией
5 from skimage import draw	Библиотека для прорисовки простых геометрических объектов
6 from datetime import datetime	Библиотека для работы с датой и временем
7 global Counterr 8 Counterr=0	Счетчик для для определения момента записи в таблицу Excel
9 Grafbook=xlwt.Workbook() 10 Grafsheet = Grafbook.add_sheet(datetime.strftime(datetime.now(), "%Y.%m.%d %H_%M_%S"))	Создаем таблицу Excel в которую возможна запись данных в процессе моделирования
11 height = 150 12 width = 250	Размерность решетки
13 u0 = 0.14	Характеристическая скорость
14 kinemV = 0.02	Вязкость жидкости
15 newtao = 1/(3*kinemV + 0.5)	Единица, деленная на решетчатое время релаксации
16 W4to9= 4.0/9.0 17 W1to9= 1.0/9.0 18 W1to36 = 1.0/36.0	базисные вектора для D2Q9
1-69 Блок функций	
1 defEkselFicsation(mtx): 2 rb=xlwt.Workbook() 3 sheet = rb.add_sheet (datetime.strftime (datetime.now(), "%Y.%m.%d %H_%M_%S")) 4 for i in range(height): 5 for j in range(width): 6 sheet.write(i,j,mtx[i,j]) 7 j=j+1 8 i=i+1 9 rb.save(datetime.strftime(datetime.now(), "%Y.%m.%d %H_%M_%S")+ ".xls")	Функция записи матрицы в эксель файл с именем текущей даты и времени
10 def streaming(): 11 global f2, f4, f1, f3, f5, f6, f8, f7 12 f2 = numpy.roll(f2, 1, axis=0) 13 f5 = numpy.roll(f5, 1, axis=0)	Функция распространения

<pre> 14 f6 = numpy.roll(f6, 1, axis=0) 15 f4 = numpy.roll(f4,-1, axis=0) 16 f8 = numpy.roll(f8,-1, axis=0) 17 f7 = numpy.roll(f7,-1, axis=0) 18 f1 = numpy.roll(f1, 1, axis=1) 19 f5 = numpy.roll(f5, 1, axis=1) 20 f8 = numpy.roll(f8, 1, axis=1) 21 f3 = numpy.roll(f3,-1, axis=1) 22 f6 = numpy.roll(f6,-1, axis=1) 23 f7 = numpy.roll(f7,-1, axis=1) 24 f2[barrierN] = f4[barrier] 25 f4[barrierS] = f2[barrier] 26 f1[barrierE] = f1[barrier] 27 f3[barrierW] = f1[barrier] 28 f5[barrierNE] = f7[barrier] 29 f6[barrierNW] = f8[barrier] 30 f8[barrierSE] = f6[barrier] 31 f7[barrierSW] = f5[barrier] </pre>	
<pre> 32 def collision(): 33 global rho, ux, uy, f0, f2, f4, f1, f3, f5, f6, f8, f7, u2 34 rho = f0 + f2 + f4 + f1 + f3 + f5 + f8 + f6 + f7 35 ux = (f1 + f5 + f8 - f3 - f6 - f7) / rho 36 uy = (f2 + f5 + f6 - f4 - f8 - f7) / rho 37 ux2 = ux * ux 38 uy2 = uy * uy 39 u2 = ux2 + uy2 40 uxuy = ux * uy 41 omu215 = 1 - 1.5*u2 42 f0 = (1-newtao)*f0 + newtao * W4to9 * rho * omu215 43 f2 = (1-newtao)*f2 + newtao * W1to9 * rho * (omu215 + 3*uy + 44 4.5*uy2) 45 f4 = (1-newtao)*f4 + newtao * W1to9 * rho * (omu215 - 3*uy + 4.5*uy2) 46 f1 = (1-newtao)*f1 + newtao * W1to9 * rho * (omu215 + 3*ux + 47 4.5*ux2) 48 f3 = (1-newtao)*f3 + newtao * W1to9 * rho * (omu215 - 3*ux + 4.5*ux2) 49 f5 = (1-newtao)*f5 + newtao * W1to36 * rho * (omu215 + 3*(ux+uy) + 50 4.5*(u2+2*uxuy)) 51 f6 = (1-newtao)*f6 + newtao * W1to36 * rho * (omu215 + 3*(-ux+uy) + 52 4.5*(u2-2*uxuy)) 53 f8 = (1-newtao)*f8 + newtao * W1to36 * rho * (omu215 + 3*(ux-uy) + 54 4.5*(u2-2*uxuy)) 55 f7 = (1-newtao)*f7 + newtao * W1to36 * rho * (omu215 + 3*(-ux-uy) + 56 4.5*(u2+2*uxuy)) 57 f1[:,0] = W1to9 * (1 + 3*u0 + 4.5*u0**2 - 1.5*u0**2) 58 f3[:,0] = W1to9 * (1 - 3*u0 + 4.5*u0**2 - 1.5*u0**2) 59 f5[:,0] = W1to36 * (1 + 3*u0 + 4.5*u0**2 - 1.5*u0**2) 60 f8[:,0] = W1to36 * (1 + 3*u0 + 4.5*u0**2 - 1.5*u0**2) 61 f6[:,0] = W1to36 * (1 - 3*u0 + 4.5*u0**2 - 1.5*u0**2) 62 f7[:,0] = W1to36 * (1 - 3*u0 + 4.5*u0**2 - 1.5*u0**2) </pre>	<p>Функция столкновения</p>
<pre> 57 def curl(ux, uy): 58 return numpy.roll(uy,-1,axis=1) - numpy.roll (uy,1,axis=1) - numpy.roll(ux,-1,axis=0) + numpy.roll(ux,1,axis=0) </pre>	<p>Функция определяющая направление и силу вихря</p>
<pre> 59 defnextFrame(arg): 60 global Counterr 61 for step in range(20): </pre>	<p>Функция моделирования течения и записи данных в таблицу Excel</p>

62	streaming()	
63	collision()	
64	fluidImage2.set_array(curl(ux,uy))	
65	Grafsheet.write(Counterr,1,uy[75,200])	
66	Counterr=Counterr+1	
67	if Counterr==500:	
68	Grafbook.save(datetime.strftime(datetime.now(), "%Y.%m. %d %H_%M_%S")+".dot.xls")	
69	EkseIFicsation(curl(ux,uy))	
1-12 Блок первоначального состояния		
1	f0 = W4to9 * (numpy.ones((height,width)) - 1.5*u0**2)	Формируются начальные значения элементов матриц
2	f2 = W1to9 * (numpy.ones((height,width)) - 1.5*u0**2)	
3	f4 = W1to9 * (numpy.ones((height,width)) - 1.5*u0**2)	
4	f1 = W1to9 * (numpy.ones((height,width)) + 3*u0 + 4.5*u0**2 - 1.5*u0**2)	
5	f3 = W1to9 * (numpy.ones((height,width)) - 3*u0 + 4.5*u0**2 - 1.5*u0**2)	
6	f5 = W1to36 * (numpy.ones((height,width)) + 3*u0 + 4.5*u0**2 - 1.5*u0**2)	
7	f8 = W1to36 * (numpy.ones((height,width)) + 3*u0 + 4.5*u0**2 - 1.5*u0**2)	
8	f6 = W1to36 * (numpy.ones((height,width)) - 3*u0 + 4.5*u0**2 - 1.5*u0**2)	
9	f7 = W1to36 * (numpy.ones((height,width)) - 3*u0 + 4.5*u0**2 - 1.5*u0**2)	
10	rho = f0 + f2 + f4 + f1 + f3 + f5 + f8 + f6 + f7	
11	ux = (f1 + f5 + f8 - f3 - f6 - f7) / rho	
12	uy = (f2 + f5 + f6 - f4 - f8 - f7) / rho	
1-25 Блок описания препятствий для модели потока		
1	barrier = numpy.zeros((height,width), bool)	Если в начале строки стоит символ «#» то программа проигнорирует ее выполнение при запуске. Для выполнения этих строк кода программой необходимо удалить символ «#».
2	rad=height*0.1	
3	#barrier[(height/2)-7:(height/2)+7, height/2] = True	
4	ver=height/2	
5	hor=width/5	
6	ro, co = draw.circle(ver, hor, rad)	
7	barrier[ro, co] = True	
8	#r=numpy.array([height/2- rad,height/2+rad,height/2])	
9	# c = numpy.array([width/10, width/10, width/6])	
10	# rr, cc = draw.polygon(r, c)	
11	# barrier[rr, cc] = True	
12	#barrier[50, 0:200] = True	
13	#barrier[100, 0:150] = True	
14	#barrier[50:100, 200] = True	
15	#barrier[100:150, 150] = True	
16	#barrier[149, 150:250] = True	
17	#barrier[100, 200:250] = True	
18	barrierN= numpy.roll(barrier,1, axis=0)	
19	barrierS= numpy.roll(barrier, -1, axis=0)	
20	barrierE= numpy.roll(barrier,1, axis=1)	
21	barrierW= numpy.roll(barrier, -1, axis=1)	
22	barrierNE = numpy.roll(barrierN, 1, axis=1)	
23	barrierNW = numpy.roll(barrierN,-1, axis=1)	
24	barrierSE = numpy.roll(barrierS, 1, axis=1)	
25	barrierSW = numpy.roll(barrierS,-1, axis=1)	

1-6 Блок визуализации расчетов		
1	<code>theFig=matplotlib.pyplot.figure(figsize=(8,3))</code>	Описание окна визуализации
2	<code>fluidImage2 = matplotlib.pyplot.imshow (curl(ux,uy), origin='lower', norm=matplotlib.pyplot.Normalize(-.1,.1), cmap=matplotlib.pyplot.get_cmap('RdYlGn'), interpola- tion='none')</code>	Параметры визуализируемой матрицы
3	<code>bImageArray = numpy.zeros((height, width, 4), numpy.uint8)</code>	Параметры визуализации препятствий
4	<code>bImageArray[barrier,3] = 200</code>	
5	<code>barrierImage = matplotlib.pyplot.imshow (bImageArray, origin='lower', interpolation='none')</code>	
6	<code>animate = matplotlib.animation.FuncAnimation (theFig, nextFrame, interval=1, blit=True)</code>	Визуализация

Таблица 16 – Напряжение на обкладках ионистора в процессе разряда

t, с	$\Delta t=0,01$ с	$\Delta t=0,1$ с	$\Delta t=1$ с	t, с	$\Delta t=0,01$ с	$\Delta t=0,1$ с	$\Delta t=1$ с
	Напряжение U, В				Напряжение U, В		
0	6	6	6	50	4,50	4,50	4,50
1	5,97	5,97	5,97	51	4,47	4,47	4,47
2	5,94	5,94	5,94	52	4,44	4,44	4,44
3	5,91	5,91	5,91	53	4,41	4,41	4,41
4	5,88	5,88	5,88	54	4,38	4,38	4,38
5	5,85	5,85	5,85	55	4,35	4,35	4,35
6	5,82	5,82	5,82	56	4,32	4,32	4,32
7	5,79	5,79	5,79	57	4,29	4,29	4,29
8	5,76	5,76	5,76	58	4,26	4,26	4,26
9	5,73	5,73	5,73	59	4,23	4,23	4,23
10	5,70	5,70	5,70	60	4,20	4,20	4,20
11	5,67	5,67	5,67	61	4,17	4,17	4,17
12	5,64	5,64	5,64	62	4,14	4,14	4,14
13	5,61	5,61	5,61	63	4,11	4,11	4,11
14	5,58	5,58	5,58	64	4,08	4,08	4,08
15	5,55	5,55	5,55	65	4,05	4,05	4,05
16	5,52	5,52	5,52	66	4,02	4,02	4,02
17	5,49	5,49	5,49	67	3,99	3,99	3,99
18	5,46	5,46	5,46	68	3,96	3,96	3,96
19	5,43	5,43	5,43	69	3,93	3,93	3,93
20	5,40	5,40	5,40	70	3,90	3,90	3,90
21	5,37	5,37	5,37	71	3,87	3,87	3,87
22	5,34	5,34	5,34	72	3,84	3,84	3,84
23	5,31	5,31	5,31	73	3,81	3,81	3,81

24	5,28	5,28	5,28	74	3,78	3,78	3,78
25	5,25	5,25	5,25	75	3,75	3,75	3,75
26	5,22	5,22	5,22	76	3,72	3,72	3,72
27	5,19	5,19	5,19	77	3,69	3,69	3,69
28	5,16	5,16	5,16	78	3,66	3,66	3,66
29	5,13	5,13	5,13	79	3,63	3,63	3,63
30	5,10	5,10	5,10	80	3,60	3,60	3,60
31	5,07	5,07	5,07	81	3,57	3,57	3,57
32	5,04	5,04	5,04	82	3,54	3,54	3,54
33	5,01	5,01	5,01	83	3,51	3,51	3,51
34	4,98	4,98	4,98	84	3,48	3,48	3,48
35	4,95	4,95	4,95	85	3,45	3,45	3,45
36	4,92	4,92	4,92	86	3,42	3,42	3,42
37	4,89	4,89	4,89	87	3,39	3,39	3,39
38	4,86	4,86	4,86	88	3,36	3,36	3,36
39	4,83	4,83	4,83	89	3,33	3,33	3,33
40	4,80	4,80	4,80	90	3,30	3,30	3,30
41	4,77	4,77	4,77	91	3,27	3,27	3,27
42	4,74	4,74	4,74	92	3,24	3,24	3,24
43	4,71	4,71	4,71	93	3,21	3,21	3,21
44	4,68	4,68	4,68	94	3,18	3,18	3,18
45	4,65	4,65	4,65	95	3,15	3,15	3,15
46	4,62	4,62	4,62	96	3,12	3,12	3,12
47	4,59	4,59	4,59	97	3,09	3,09	3,09
48	4,56	4,56	4,56	98	3,06	3,06	3,07
49	4,53	4,53	4,53	99	3,03	3,03	3,04
				100	3,00	3,00	3,01

Таблица 17 – Напряжение на обкладках ионистора при укрупненных временных интервалах

n	$\Delta t=10c$	$\Delta t=20 c$	$\Delta t=50 c$	
	Напряжение U, В			
0	6,00	6,00	6,00	6,00
1	5,70	5,42	4,67	
2	5,41	4,86	3,39	
3	5,12	4,29	–	
4	4,83	3,73	–	
5	4,54	3,18	–	

6	4,25	–	–
7	3,96	–	–
8	3,67	–	–
9	3,38	–	–
10	3,09	–	–

Таблица 18 – Распределение долей слагаемых энергетического баланса от полной запасенной энергии при различном количестве ионисторов в группе

Количество ионисторов в группе, m	1	2	4	8
Доля отданной энергии ($W_{отд}$)	75%	93,8%	98,4%	99,6%
Доля неиспользованной энергии ($W-W_{отд}$)	25%	6,3%	1,6%	0,4%

Таблица 19 – Результаты экспериментального исследования распределения поля в пространстве рабочей камеры

Пространственные координаты, см			Значение дозы по повторностям, кДж/кг				Средняя доза, кДж/кг
X	Y	Z					
3,8	4,2	0	174,909	175,361	174,473	173,657	174,6
3,8	4,2	5	204,572	203,223	203,195	205,409	204,1
3,8	4,2	10	174,154	172,809	172,647	174,389	173,5
3,8	12,6	0	189,820	190,770	189,108	190,302	190,0
3,8	12,6	5	221,441	221,463	222,197	221,299	221,6
3,8	12,6	10	184,514	184,704	184,766	187,615	185,4
3,8	21,0	0	176,403	177,630	175,500	178,267	177,2
3,8	21,0	5	209,006	208,536	209,541	210,117	209,3
3,8	21,0	10	173,338	173,235	173,824	173,603	173,5
11,4	4,2	0	173,452	172,393	172,420	172,134	172,6
11,4	4,2	5	206,091	206,443	207,505	207,162	206,8
11,4	4,2	10	172,320	173,412	173,876	173,193	173,2
11,4	12,6	0	186,511	186,358	186,790	189,540	187,3
11,4	12,6	5	227,288	227,218	226,887	224,606	226,5
11,4	12,6	10	192,820	193,325	193,425	195,629	193,8
11,4	21,0	0	174,214	175,290	174,387	176,909	175,2
11,4	21,0	5	210,170	208,874	208,992	210,364	209,6
11,4	21,0	10	177,922	176,933	177,316	178,628	177,7
29,0	4,2	0	155,996	157,308	155,724	156,572	156,4
29,0	4,2	5	187,678	187,473	187,324	166,724	187,3

29,0	4,2	10	154,973	155,031	156,520	157,076	155,9
29,0	12,6	0	170,141	168,837	168,697	169,126	169,2
29,0	12,6	5	204,607	204,939	203,357	204,297	204,3
29,0	12,6	10	169,699	171,141	170,075	171,484	170,6
29,0	21,0	0	157,701	157,895	157,707	155,890	157,3
29,0	21,0	5	190,252	191,097	191,261	189,390	190,5
29,0	21,0	10	160,882	160,258	159,458	161,000	160,4

Таблица 20 – Результаты сравнения экспериментальных и теоретических значений дозы

№ точки	X	Y	Z	$D_{\text{эсп.}}$	$D_{\text{теор.}}$	$\Delta, \%$	$D_{\text{нелин.}}$	$\Delta_1, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3,8	4,2	0	174,6	191,2	9,5	173,3	0,7
2	11,4	4,2	0	172,6	183,9	6,6	174,3	0,9
3	29,0	4,2	0	156,4	172,0	10,0	154,1	1,4
4	3,8	12,6	0	190,0	192,6	1,4	189,1	0,5
5	11,4	12,6	0	187,3	186,8	0,2	190,1	1,5
6	29,0	12,6	0	169,2	173,4	2,5	170,0	0,5
7	3,8	21,0	0	177,2	194,1	9,6	175,7	0,9
8	11,4	21,0	0	175,2	188,3	7,5	176,7	0,9
9	29,0	21,0	0	157,3	174,9	11,2	156,6	0,4
10	3,8	4,2	5	204,1	191,4	6,2	205,7	0,8
11	11,4	4,2	5	206,8	185,6	10,2	207,2	0,2
12	29,0	4,2	5	187,3	172,2	8,03	188,2	0,5
13	3,8	12,6	5	221,6	192,9	13,0	221,7	0,1
14	11,4	12,6	5	226,5	187,1	17,4	223,2	1,5
15	29,0	12,6	5	204,3	173,7	14,9	204,2	0
16	3,8	21,0	5	209,3	194,3	7,1	208,6	0,4
17	11,4	21,0	5	209,6	188,5	10,03	210,1	0,2
18	29,0	21,0	5	190,5	175,1	8,04	191,2	0,3
19	3,8	4,2	10	173,5	191,6	10,5	171,9	0,9
20	11,4	4,2	10	173,2	185,8	7,3	173,8	0,4
21	29,0	4,2	10	155,9	172,4	10,6	155,9	0
22	3,8	12,6	10	185,4	193,1	4,2	188,1	1,5
23	11,4	12,6	10	193,8	187,3	3,3	190,1	1,9
24	29,0	12,6	10	170,6	173,9	2,0	172,3	1,0

25	3,8	21,0	10	173,5	194,5	12,2	175,2	1,0
26	11,4	21,0	10	177,7	188,8	6,3	177,2	0,3
27	29,0	21,0	10	160,4	175,4	9,4	159,4	0,6

Таблица 21 – Результаты уточненного эксперимента по замерам дозы СВЧ-воздействия на контрольный материал

№	Координаты расположения контрольного материала, см			Экспериментальные значения дозы СВЧ-воздействия, кДж/кг				Средние
				По повторностям				
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	I	II	III	IV	
1	0	0	0	169,70	171,79	169,70	171,79	170,75
2	11	0	0	173,89	171,79	171,79	173,89	172,84
3	22	0	0	152,94	155,03	148,75	163,41	155,03
4	0	11,85	0	157,13	150,84	148,75	152,94	152,42
5	0	23,70	0	180,17	165,51	175,98	171,79	173,36
6	11	11,85	0	180,17	173,89	167,60	173,89	173,89
7	22	11,85	0	159,22	155,03	146,65	159,22	155,03
8	11	23,70	0	186,46	178,08	180,17	178,08	180,70
9	22	23,70	0	186,46	165,51	165,51	171,79	172,12
10	0	0	9,75	145,39	171,79	169,70	167,60	163,62
11	11	0	9,75	169,93	208,22	209,50	201,12	202,69
12	22	0	9,75	171,79	163,41	169,70	163,41	167,08
13	0	11,85	9,75	178,08	167,60	173,89	169,70	172,32
14	0	23,70	9,75	186,46	165,51	173,89	167,60	173,36
15	11	11,85	9,75	169,70	163,41	159,22	163,41	163,94
16	22	11,85	9,75	196,93	182,27	186,46	184,36	187,51
17	11	23,70	9,75	205,31	188,55	184,36	186,46	191,17
18	22	23,70	9,75	189,81	180,17	178,08	182,27	182,58
19	11	0	19,50	215,79	196,93	190,65	188,55	197,98
20	22	0	19,50	167,60	171,79	159,22	163,41	165,51
21	0	0	19,50	184,36	169,70	180,17	184,36	179,65
22	0	11,85	19,50	196,93	184,36	182,27	178,08	185,41
23	0	23,70	19,50	175,98	161,32	155,03	155,03	161,84
24	11	11,85	19,50	186,46	178,08	167,60	169,70	175,46
25	22	11,85	19,50	182,27	182,27	173,89	167,60	176,51
26	11	23,70	19,50	211,60	213,69	182,27	186,46	198,51
27	22	23,70	19,50	180,17	175,98	163,41	165,51	171,27

Таблица 22 – Средние экспериментальные и теоретические значения дозы

№ опыта	Координаты расположения контрольного материала, см			Средние экспери- ментальные значения дозы, кДж/кг	Значения дозы, полученные по математической модели, кДж/кг	Отклонения, %
	X	Y	Z			
1	0	0	0	170,75	167,02	2,18
2	11	0	0	172,84	175,10	1,31
3	22	0	0	155,04	156,35	0,85
4	0	11,85	0	152,42	161,35	5,86
5	0	23,70	0	173,37	173,36	$5,3 \cdot 10^{-3}$
6	11	11,85	0	173,89	165,38	4,89
7	22	11,89	0	155,03	155,13	0,67
8	11	22,70	0	180,70	180,00	0,40
9	22	23,70	0	172,18	172,88	0,32
10	0	0	9,75	163,62	172,87	5,35
11	11	0	9,75	202,69	189,01	6,75
12	22	0	9,75	167,08	172,59	3,27
13	0	11,85	9,75	172,32	163,45	5,15
14	0	23,70	9,75	173,37	171,80	0,91
15	11	11,85	9,75	163,94	183,15	11,72
16	22	11,85	9,75	187,51	176,30	5,98
17	11	23,70	9,75	191,17	189,20	1,03
18	22	23,70	9,75	182,58	186,62	2,11
19	11	0	19,50	197,98	194,11	1,96
20	22	0	19,50	165,51	156,47	0,58
21	0	0	19,50	179,65	182,36	1,51
22	0	11,85	19,50	185,41	174,31	5,99
23	0	23,70	19,50	161,84	171,15	5,75
24	11	11,85	19,50	175,45	190,23	8,42
25	22	11,85	19,50	174,51	173,33	1,80
26	11	23,70	19,50	198,51	185,89	6,36
27	22	23,70	19,50	171,27	174,37	1,81

Таблица 23 – Значения дискрет в функции высоты расположения линий уровня

Высота расположения линий уровня (z), см	Обозначения линий уровня	Значения дискрет, кДж/кг	Высота расположения линий уровня (z), см	Обозначения линий уровня	Значения дискрет, кДж/кг
4	0	164,83	4	5	181,30
4	1	168,12	4	6	184,59
4	2	171,42	4	7	187,89
4	3	174,71	4	8	191,17
4	4	178,00	4	9	194,47
8	0	170,96	12	5	198,82
8	1	175,03	12	6	203,73
8	2	179,11	12	7	208,65
8	3	183,18	12	8	213,56
8	4	187,26	12	9	218,47
8	5	191,33	16	0	173,33
8	6	195,40	16	1	179,33
8	7	199,48	16	2	185,33
8	8	203,55	16	3	191,33
8	9	207,63	16	4	197,32
12	9	174,27	16	5	203,32
12	1	179,18	16	6	209,32
12	2	184,09	16	7	215,32
12	3	189,00	16	8	221,32
12	4	193,91	16	9	227,31

Таблица 24 – Значения ординат экстремумов осциллограмм при различных режимах работы СВЧ-генератора

Режим работы СВЧ-генератора	Ординаты экстремумов исследуемых кривых и результаты их сопоставления, отн.ед.						
	AM	BN	CK	DL	$h_1 = AM + CK$	$h_2 = BN + DL$	$\varepsilon = h_2 - h_1$
Нормальный	60	64	49	58	109	122	13
Аварийный	55	78	44	68	99	146	47

Таблица 25 – Амплитуды гармонических составляющих анодного тока магнетрона при нормальном и аварийном режимах работы СВЧ-генератора

Режим работы СВЧ-генератора	Амплитуды третьей и пятой гармоник и результаты их сопоставления, отн.ед		
	A_3	A_5	$A_3 + A_5$
Нормальный	56,57	21,54	78,11
Аварийный	83,54	36,61	120,15

Таблица 26 – Амплитуды гармонических составляющих при нормальном режиме работы СВЧ-генератора

Амплитуды гармонических составляющих, отн.ед.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-0,17	0,05	0	-0,38	0,26	-0,52	-0,16	-0,08	-0,38
1	61,01	60,57	60,28	58,11	59,74	61,03	58,15	58,20	60,28
2	1,65	1,54	2,59	3,67	2,62	0,95	1,62	1,03	3,90
3	3,30	2,78	4,68	4,98	4,61	3,84	5,33	5,20	1,49
4	1,48	0,91	0,64	2,76	2,90	1,30	1,31	1,99	1,69
5	2,82	4,30	5,17	2,76	4,07	3,90	2,71	2,26	2,91
6	0,55	0,71	1,36	2,28	0,83	1,43	0,29	1,24	2,51
7	2,86	4,10	3,31	2,93	2,95	2,37	1,46	1,69	2,77
8	0,14	0,41	1,43	1,37	0,41	0,90	0,39	1,16	1,12
9	1,75	1,89	1,10	1,71	0,81	1,04	0,65	1,62	0,81
10	0,22	0,33	0,14	0,64	0,46	0,56	0,13	1,41	1,75
11	0,09	0,51	0,37	1,40	0,21	0,28	0,43	0,93	0,79
12	0,09	0,39	0,12	1,13	0,44	0,27	0,49	0,03	0,55
13	0,63	0,70	0,41	0,89	0,23	0,44	0,29	0,89	0,73
14	0,44	0,32	0,20	0,29	0,10	0,74	0,30	0,40	1,33

	10	11	12	13	14	15	16	Средние по повторностям
0	0	-0,29	0,18	-0,52	-0,10	-0,89	-0,06	0,168
1	61,91	59,51	61,58	61,08	60,92	60,21	60,21	60,17
2	3,57	3,95	2,64	1,41	1,46	2,09	2,15	2,300
3	3,74	5,30	4,49	3,63	2,31	4,49	3,74	3,990
4	3,94	0,41	2,47	1,37	1,54	1,65	1,15	0,560
5	2,55	4,57	3,07	2,51	3,69	3,01	2,63	3,313
6	0,99	1,63	0,71	0,88	0,71	0,42	0,14	1,040
7	2,56	1,75	2,89	2,03	2,90	2,46	1,94	2,560
8	2,04	0,39	0,94	0,56	0,54	0,52	0,66	0,810
9	0,73	1,54	0,37	0,98	1,59	1,02	0,60	1,140
10	0,66	1,02	0,45	0,22	0,68	0,25	0,14	0,570
11	1,48	0,87	1,04	0,09	0,51	0,49	0,29	0,610
12	1,95	0,79	0,74	0,28	0,49	0,29	0,22	0,570
13	0,26	1,09	0,78	0,22	0,31	0,70	0,24	0,550
14	1,09	1,07	0,79	0,19	0,18	0,20	0,67	0,520

Таблица 27 – Амплитуды гармонических составляющих при аварийном режиме работы СВЧ-генератора

Амплитуды гармонических составляющих, отн.ед.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-0,87	-0,32	-0,77	-0,74	-0,24	-0,71	-0,27	-0,68	0
1	57,89	55,52	57,66	56,05	57,20	56,76	57,77	56,07	57,01
2	4,64	5,57	1,60	0,72	2,00	2,22	2,45	0,57	2,02
3	2,98	4,40	5,56	4,13	4,65	3,99	5,50	2,86	3,74
4	3,09	2,35	1,80	0,45	0,90	1,88	1,55	1,04	0,50
5	2,74	2,35	3,67	4,44	5,55	4,52	4,57	4,89	5,29
6	1,42	0,99	2,90	0,49	1,11	0,71	1,30	0,71	1,52
7	6,03	2,34	4,03	3,42	3,46	3,26	2,73	3,01	3,28
8	3,41	1,33	0,59	0,89	0,77	0,49	0,47	0,64	0,97
9	3,23	1,12	1,16	1,51	1,48	1,50	1,90	1,11	1,07
10	0,90	0,59	1,49	0,64	0,74	0,14	0,15	0,81	0,37
11	1,37	0,24	1,28	0,41	0,77	0,45	1,47	0,56	0,49
12	2,44	0,50	1,01	0,82	0,24	0,56	0,58	0,86	0,56
13	3,48	0,66	0,58	0,90	0,82	0,46	1,07	0,77	0,49
14	3,25	0,17	0,48	0,93	0,22	0,05	0,65	1,00	0,50

	10	11	12	13	14	15	16	Средние по повторностям
0	-0,59	-0,36	-0,59	-0,43	-0,70	0,24	-0,42	-0,420
1	56,67	57,05	57,58	58,11	57,98	57,73	57,43	57,160
2	1,05	1,47	1,39	1,47	2,35	1,67	0,38	1,970
3	4,75	3,49	6,37	5,78	7,03	6,87	6,40	4,910
4	1,85	0,83	1,87	0,92	2,13	1,87	0,49	1,470
5	5,44	5,93	4,68	5,21	5,17	6,51	5,17	4,758
6	1,34	0,68	1,14	0,54	1,14	2,06	0,36	1,150
7	3,62	4,17	1,94	3,44	2,52	3,89	3,44	3,410
8	1,39	0,82	1,91	0,49	1,35	0,84	0,29	1,040
9	1,22	2,15	0,52	2,04	1,46	2,10	2,20	1,610
10	1,17	0,13	1,45	0,33	0,88	0,65	0,74	0,700
11	0,34	0,83	1,01	0,62	0,25	1,10	1,09	0,770
12	0,80	0,47	1,48	0,57	0,16	0,37	0,79	0,760
13	0,46	0,54	1,34	0,27	0,09	0,57	0,35	0,800
14	1,25	0,16	1,67	0,33	0,22	0,30	0,32	0,720

Таблица 28 – Расчетные значения выборочных коэффициентов асимметрии и эксцесса

Номер гармонической составляющей	Выборочный коэффициент асимметрии		Выборочный коэффициент эксцесса	
	Нормальный режим	Аварийный режим	Нормальный режим	Аварийный режим
0	3,44	0,86	10,28	-0,28
1	-0,60	-0,71	1,82	0,27
2	0,41	1,45	-1,16	1,56
3	-0,73	0,09	-0,25	-1,20
4	0,34	0,29	-0,82	-0,68
5	0,76	-0,82	-0,60	0,28
6	0,80	1,26	-0,09	1,51
7	0,30	1,15	-0,08	2,26

8	0,91	2,01	0,19	3,90
9	0,15	0,78	-1,31	0,74
10	1,31	0,39	0,84	-0,62
11	0,71	0,31	-0,54	-1,23
12	1,68	1,93	2,67	3,65
13	0,31	2,73	-1,16	7,11
14	0,83	2,08	-0,60	3,98

Таблица 29 – Статистические параметры и относительное изменение гармонических составляющих

Номер гармонической составляющей	Статистика t	Статистическая надежность	Уровень значимости	Относительное изменение амплитуды, %
0	-0,553	0,978	0,022	150,00
1	-10,114	1	0	5,00
2	-0,673	0,489	0,511	14,30
3	2,018	0,938	0,062	23,10
4	-0,643	0,470	0,529	162,50
5	3,810	0,998	0,0017	43,65
6	0,480	0,362	0,638	10,60
7	2,854	0,988	0,012	33,20
8	0,9168	0,626	0,374	28,40
9	2,708	0,984	0,016	41,20
10	0,756	0,756	0,461	22,80
11	0,887	0,887	0,389	26,20
12	1,011	1,011	0,328	33,30
13	1,333	1,333	0,202	45,50
14	0,922	0,922	0,371	38,50

Таблица 30 – Результаты экспериментального исследования зависимости температуры магнетрона и напряжения пятой гармонической составляющей от продолжительности работы

Продолжительность работы, м.	Напряжение на выходе термодатчика для каждого магнетрона, В			Напряжение пятой гармонической составляющей по повторностям, В								
				магнетрон 1			магнетрон 2			магнетрон 3		
0,5	3,87	1,70	0,80	1,0	1,6	1,2	0,5	0,6	0,6	0,4	1,1	0,7
1,0	4,33	1,89	1,07	1,0	1,6	1,2	0,5	0,7	0,9	0,5	1,1	0,5
1,5	5,17	2,13	1,43	1,1	1,7	1,3	0,5	0,7	0,9	0,5	1,4	0,6
2,0	5,53	2,47	1,67	1,2	2,0	1,4	0,6	0,7	0,5	0,5	1,6	0,6

2,5	5,77	2,73	1,93	1,4	2,1	1,5	0,6	0,7	0,5	0,6	1,8	0,7
3,0	6,03	3,13	2,23	1,5	2,4	1,7	0,6	0,9	0,6	0,6	2,0	0,8
3,5	6,13	3,40	2,50	1,6	2,6	1,8	0,6	0,9	0,8	0,7	2,1	0,9
4,0	6,27	3,63	2,73	1,8	2,7	1,8	0,9	1,0	1,2	0,8	2,2	1,0
4,5	6,43	3,83	2,93	2,1	3,1	1,8	1,1	1,0	1,5	0,9	2,4	1,0
5,0	6,56	3,97	3,20	2,3	3,4	1,9	1,4	1,1	1,6	1,0	2,5	1,1
5,5	6,73	4,17	3,37	2,4	3,6	2,2	1,5	1,2	1,7	1,1	2,7	1,1
6,0	6,97	4,33	3,50	2,8	3,9	2,4	1,7	1,3	1,8	1,2	2,8	1,1
6,5	7,13	4,53	3,70	3,0	4,1	2,6	1,9	1,5	2,0	1,2	2,9	1,1
7,0	7,33	4,67	3,93	3,1	4,2	2,8	2,0	1,5	2,1	1,4	3,0	1,1
7,5	7,43	4,77	4,10	3,2	4,4	3,0	2,2	1,5	2,3	1,4	3,0	1,2
8,0	7,60	4,90	4,33	4,3	4,4	3,2	2,4	1,6	2,3	1,5	3,1	1,4
8,5	7,70	5,03	4,57	3,6	4,6	3,4	2,4	1,6	2,4	1,5	3,1	1,5
9,0	7,87	5,20	4,70	4,0	4,8	3,6	2,6	1,7	2,5	1,6	3,2	1,7
9,5	7,97	5,37	4,80	4,4	4,9	3,9	2,7	1,7	2,6	1,8	3,3	1,9
10,0	8,03	5,53	4,97	4,7	5,2	4,3	2,7	1,8	2,6	2,0	3,4	2,2
10,5	8,20	5,60	5,17	4,9	5,3	4,5	2,8	1,9	2,7	2,1	3,5	2,3
11,0	8,20	5,57	5,47	5,1	5,5	4,8	2,8	2,0	2,8	2,4	3,5	2,5
11,5	8,33	5,73	5,63	5,3	5,6	5,2	2,9	2,0	2,9	2,5	3,6	2,5
12,0	8,47	5,83	5,73	5,7	5,7	5,5	3,0	2,1	3,0	2,6	3,7	2,7
12,5	8,47	5,90	5,93	5,9	5,9	5,4	3,0	2,1	3,0	2,8	3,8	2,7
13,0	8,63	6,13	6,03	6,1	6,1	6,0	3,1	2,4	2,9	3,0	3,9	2,9
13,5	8,77	6,23	6,13	6,3	6,3	6,1	3,1	2,4	2,9	3,2	4,0	3,0
14,0	8,87	6,37	6,27	6,4	6,4	6,2	3,1	2,4	3,0	3,3	4,1	3,1
14,5	8,93	6,33	6,50	6,6	6,5	6,4	3,1	2,4	3,0	3,4	4,1	3,1
15,0	9,00	6,40	6,63	6,7	6,7	6,6	3,2	2,5	3,0	3,4	4,4	3,2
15,5	9,07	6,50	6,70	6,7	7,0	6,6	3,4	2,5	3,1	3,5	4,4	3,2
16,0	9,13	6,57	6,83	6,8	7,0	6,8	3,4	2,6	3,1	3,7	4,5	3,3
16,5	9,23	6,77	7,03	6,8	7,1	6,9	3,5	2,6	3,3	3,7	4,5	3,4
17,0	9,23	6,90	7,10	6,9	7,2	6,9	3,5	2,6	3,4	3,9	4,5	3,5
17,5	9,30	7,00	7,17	6,9	7,2	7,0	3,6	2,7	3,4	3,9	4,6	3,6
18,0	9,40	7,07	7,30	7,0	7,4	7,0	3,6	2,8	3,4	4,0	4,7	3,7
18,5	9,43	7,10	7,37	7,1	7,4	7,1	3,7	2,8	3,3	4,1	4,9	3,9
19,0	9,47	7,13	7,33	7,1	7,5	7,2	3,7	2,9	3,5	4,3	4,9	4,0
19,5	9,50	7,20	7,43	7,1	7,6	7,1	3,6	2,9	3,5	4,4	5,0	4,1
20,0	9,57	7,27	7,47	7,1	7,6	7,2	3,6	2,9	3,6	4,5	5,0	4,2

Таблица 31 – Значения дозы СВЧ-воздействия, получаемой материалом массой m при различных напряжениях U на первичной обмотке повышающего трансформатора

$m, \text{ г}$ $U, \text{ В}$	75	100	150	200	250	300	350	400
220	225,2	180,2	121,5	94,3	85,9	77,5	67,0	58,7
200	215,8	169,7	119,4	90,1	79,6	69,1	62,0	56,5
180	203,2	165,5	100,6	88,0	75,4	67,0	58,7	52,4
160	165,5	115,2	85,9	67,0	58,7	52,4	46,1	41,9
140	52,4	39,8	27,2	23,0	18,9	18,9	18,9	18,9

Таблица 32 – Значения параметров функции $D = f(m)$ при различных напряжениях на первичной обмотке повышающего трансформатора

$U, \text{ В}$	220	200	180	160	140
a	22,76	19,72	17,72	13,99	8,43
b	15245	14792	14028	10919	3191

Таблица 33 – Параметры ветродвигателя с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей

Кол-во пар лопастей (n)	Активная поверхность лопастей, м^2 при $h = R = 1$		Период, (T)	Средняя активная поверхность (S_{cp}), м^2	Коэфф-т пульсации (k)	Развиваемая мощность, (P), $\text{кВт} \cdot 10^{-3}$ при скорости ветра 3,2 м/с
	S_{min}	S_{max}				
1	0	1	π	0,64	1	1,92
2	1	$\sqrt{2}$	$\pi/2$	1,24	0,293	3,73
3	$\sqrt{3}$	2,00	$\pi/3$	1,91	0,134	5,75
4	2,41	2,01	$\pi/4$	2,54	0,076	7,65
5	3,08	3,84	$\pi/5$	3,16	0,049	9,58
6	3,73	3,86	$\pi/6$	3,68	0,034	11,51

Таблица 34 – Значения коэффициентов использования энергии ветра ξ_1 и ξ_2 при разных числах модулей z

z	$\xi_1 \cdot 10^{-2}$	$\xi_2 \cdot 10^{-2}$	z	$\xi_2 \cdot 10^{-2}$	$\xi_2 \cdot 10^{-2}$
0	0	0	0,55	6,751	10,604
0,05	1,180	1,854	0,60	6,839	10,743
0,10	2,226	3,500	0,65	6,870	10,791
0,15	3,145	4,940	0,70	6,851	10,762
0,20	3,943	6,134	0,75	6,789	10,664
0,25	4,628	7,300	0,80	6,691	10,510
0,30	5,207	8,179	0,85	6,564	10,311
0,35	5,686	8,932	0,90	6,416	10,078
0,40	6,073	9,534	0,95	6,252	9,821
0,45	6,375	10,014	1,00	6,081	9,552

0,50	6,598	10,364			
------	-------	--------	--	--	--

Таблица 35 – Зависимость расчетных значений критических межосевых расстояний от количества лопастей

Количество лопастей (n)	Угол между лопастями (β), градусы	Критическое межосевое расстояние
2	90	R
3	60	$1,04R$
4	45	$1,12R$
5	36	$1,18R$
6	30	$1,23R$

Таблица 36 – Содержание операций, выполняемых блоками алгоритма

№ блока	Выполняемая операция
1	Ввод численных значений: n ; $\Delta\varphi$; Δa
2	Вычисление $\alpha = \frac{180^\circ}{n}$; $a = 1,5 R$
4	Вычисление $x = \frac{a \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}$; $y = \frac{a \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}$
5	Вычисление $m = R^2 - x^2 - y^2$
7	Вычисление $\varphi = \varphi + \Delta\varphi$; $p = \varphi + \alpha - 90^\circ$
9	Вычисление $a = a - \Delta a$; $\varphi = 0$

Таблица 37 – Содержание операций, выполняемых блоками ускоренного алгоритма

№ блока	Выполняемая операция
2	Ввод численных значений $n_1, n_2, \Delta n$
3	Организация вычислительного цикла от n_1 до n_2 с шагом Δn
4	$R = 1$; $\varphi = 0$; $a = 2$; $\Delta\varphi = 10^\circ$; $\Delta a = 0,1$; $\omega = 0$
5	$\Delta\varphi = \frac{\pi \cdot \Delta\varphi^\circ}{180^\circ}$; $\alpha = \frac{\pi}{n}$
6	$x = \frac{a \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}$; $y = \frac{a \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}$
7	$m = R^2 - a^2 - y^2$
8	$m \geq 0$
9	$\omega = 0$
10	$\omega = 1$
11	$\Delta a \leq 0,001$
12	$\Delta a \leq 0,001$; $\Delta\varphi \leq 0,1$
14	$\varphi = \varphi + \Delta\varphi$; $p = \varphi + \alpha - \pi/2$
15	$p < 0$
16	$a = a - \Delta a$; $\varphi = 0$

17	$\omega = 0$
18	$\Delta\varphi \leq 0,1$
19	$a = a - \Delta a; \varphi = \varphi - \Delta\varphi$
20	$\Delta\varphi = \frac{\Delta\varphi}{10}$
21	$a = a + \Delta a; \varphi = \varphi - \Delta\varphi$
22	$\Delta a = \frac{\Delta a}{10}$

Таблица 38 – Значения минимально допустимых межосевых расстояний, полученные в результате компьютерного моделирования

Количество лопастей	Межосевое расстояние в долях от R	Количество лопастей	Межосевое расстояние в долях от R	Количество лопастей	Межосевое расстояние в долях от R
2	1,000	12	1,428	22	1,579
3	1,048	13	1,449	23	1,589
4	1,115	14	1,469	24	1,598
5	1,176	15	1,487	25	1,607
6	1,229	16	1,503	26	1,616
7	1,274	17	1,518	27	1,623
8	1,313	18	1,532	28	1,630
9	1,347	19	1,545	29	1,638
10	1,377	20	1,557	30	1,645
11	1,404	21	1,569		

Таблица 39 – Значения отклонений средней точки исходной кривой (величины E) от искусственной прямой для аппроксимирующих функций

№ функции	Величина E	№ функции	Величина E
1	1,157	9	$9,962 \cdot 10^{-1}$
2	3,909	10	3,678
3	$-2,73 \cdot 10^{-1}$	11	$-5,049 \cdot 10^{-1}$
4	$8,36 \cdot 10^{-2}$	12	$-1,477 \cdot 10^{-1}$
5	1,243	13	1,053
6	3,995	14	3,805
7	$-1,88 \cdot 10^{-1}$	15	$-3,78 \cdot 10^{-1}$
8	$1,689 \cdot 10^{-1}$	16	$-2,089 \cdot 10^{-2}$

Таблица 40 — Результаты измерений усилий на разрушение оболочки драже при различных частотах вращения рабочего органа

№	Частота вращения рабочего органа, m^{-1}	Усилие на разрушение по повторностям, г						Средние усилия на разрушение, г
		I	II	III	IV	V	VI	
1	10	78	85	62	81	69	75	75
2	20	129	142	146	134	140	137	138
3	25	215	212	196	300	185	192	200
4	30	250	263	260	270	258	277	263
5	35	352	360	362	350	343	333	350
6	40	431	418	396	412	425	438	420
7	50	477	501	494	481	472	485	485

Таблица 41 – Масса смеси, не вступившей в процесс образования драже, для образцов с различными усилиями на разрушение

№	Усилие на разрушение, г	Масса смеси, не вступившей в процесс образования драже, г.						Средние значения масс смеси, г.
		I	II	III	IV	V	VI	
1	75	2,18	2,21	2,16	2,17	2,17	2,16	2,175
2	138	2,07	2,03	2,03	2,03	2,03	2,04	2,040
3	200	1,85	1,80	1,84	1,82	1,81	1,80	1,820
4	263	1,58	1,56	1,55	1,57	1,54	1,56	1,560
5	350	1,27	1,28	1,31	1,33	1,32	1,29	1,300
6	420	1,00	0,95	1,05	1,00	1,04	1,02	1,010
7	485	0,78	0,80	0,80	0,76	0,78	0,76	0,780

Таблица 42 – Обозначения и диапазоны варьирования исследуемых факторов

Наименования исследуемых факторов	Обозначения факторов	Диапазоны варьирования значениями факторов
Угол наклона рабочего органа	$(\alpha = x_1)$	[45...62°]
Влажность исходной смеси	$(\varphi = x_2)$	[10...45%]
Частота вращения рабочего органа	$(n = x_3)$	[20...50 m^{-1}]
Состав смеси второго этапа дражирования (содержание частей песка при одной части глины)	$(m = x_4)$	[0...2]
Продолжительность первого этапа дражирования	$(t = x_3)$	[5...25 м]
Режим подачи исходных компонентов (вода и смесь одновременно – да, вода и смесь поочередно – нет)	(x_6)	[Да, нет]

Таблица 43 – Значения уровней факторов и интервалов их варьирования

Факторы	x_1 , град	x_2 , %	x_3 , m^{-1}	x_4 , часть	x_5 , м	x_6 ,
Верхний уровень	62	45	50	2	25	Одновременно
Нижний уровень	53	25	10	0	15	Непрерывно
Интервал варьирования	45	10	20	1	5	–

Таблица 44 – Крутое восхождение по плану Бокса-Уилсона

Фактор	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
Коэффициент регрессии	0,007	0,403	0,104	–0,025	0,051
Интервал варьирования	4,5	10	20	1	5
Шаг поиска	0,03	4	2	–0,025	0,3
Нулевой уровень	57,5	35	30	1	20

Таблица 45 – План поиска оптимальных значений исследуемых факторов методом Бокса-Уилсона

Номер опыта	Вид опыта	Факторы					КНС, г		
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	I	II	Средн. значен.
9	Нулевой	57,5	35	30	1,00	20,0	1,515	1,385	1,450
10	Мысл.	57,47	31	28	1,03	19,7	–	–	–
11	Мысл.	57,41	27	26	1,06	14,4	–	–	–
12	Реализов.	57,38	23	24	1,09	19,1	1,075	–	1,075
13	Мысл.	57,35	19	22	1,11	18,8	–	–	–
14	Реализов.	57,32	15	20	1,14	18,5	0,485	–	0,485
15	Реализов.	57,29	11	18	1,17	18,2	0,171	0,192	0,185
16	Реализов.	57,26	7	10	1,20	18,0	0	0	0

Таблица 46 – Сравнительные характеристики теплоносителей

№	Наименование жидкости	Температура кипения, °С	Среднее значение динамического коэффициента вязкости, в рабочем диапазоне температур Па/с	Плотность при 40°С, кг/куб.м	Плотность при 60°С, кг/куб.м	Преобразованная мощность, Вт
1	Вода	100,0	577,9	992,0	982,9	3,1
2	Бензол	80,1	447,5	858,0	837,0	4,0
3	Толуол	110,6	428,5	850,1	831,1	3,8
4	орто-Ксилол	144,4	561,5	863,6	846,8	3,6
5	мета-Ксилол	138,1	446,0	848,0	830,0	3,7
6	пара-Ксилол	138,4	463,0	844,0	827,0	3,6
7	Этилацетат	77,06	332,9	875,0	850,0	5,4
8	Тетрахлорметан	76,60	659,3	1556,0	1518,0	9,8
9	Дихлорэтан	83,4	581,0	1224,0	1194,0	6,8
10	Трихлорэтан	113,9	695,2	1589,0	1557,0	8,3
11	Хлорбензол	131,8	581,0	1085	1064,0	5,08

Таблица 47 – Стоимость дополнительного оборудования

№	Наименование элемента	Кол-во	Примерная стоимость, руб.
1	Озонатор	1	2100-00
2	Ионизатор	1	950-00
3	Термоэлектрические элементы	1	1720-00
4	Статический преобразователь напряжения (инвертор)	1	2400-00
5	Газоструйный излучатель акустических колебаний	1	680-00
6	Воздуховод	1	160-00
7	Регулятор	1	700-00
		Итого:	8710-00

Таблица 48 – Чистый дисконтируемый доход

Шаг	Денежный поток (ден. ед.)				Дисконтируемый поток (ден. ед.)	
	Доход	Расход	Суммарно	Нарастающим итогом	На шаге	Нарастающим итогом
0	0	13065	-13065	-13065	-13065	-13065
1	9634	0	9634	-3431	7935	-5129
2	9634	0	9634	6203	6537	1407
3	9634	0	9634	15837	5384	6792
4	9634	0	9634	25471	4435	11227
5	9634	0	9634	35105	3653	14881

Таблица 49 – Значения отклонений средней точки исходной кривой (величины E) от искусственной прямой для аппроксимирующих функций

№ функции	Величина E	№ функции	Величина E
1	1,157	9	$9,962 \cdot 10^{-1}$
2	3,909	10	3,678
3	$-2,73 \cdot 10^{-1}$	11	$-5,049 \cdot 10^{-1}$
4	$8,36 \cdot 10^{-2}$	12	$-1,477 \cdot 10^{-1}$
5	1,243	13	1,053
6	3,995	14	3,805
7	$-1,88 \cdot 10^{-1}$	15	$-3,78 \cdot 10^{-1}$
8	$1,689 \cdot 10^{-1}$	16	$-2,089 \cdot 10^{-2}$

Приложение Б – Алгоритмы и графические зависимости

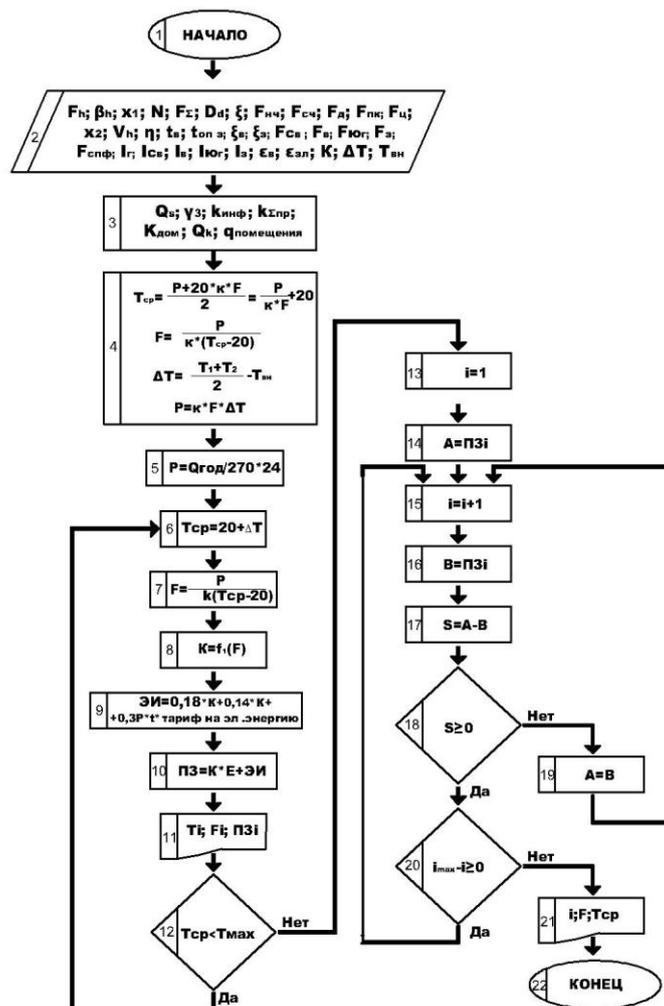


Рисунок 1 – Алгоритм определения оптимального соотношения температуры теплоносителя и рабочей поверхности теплообменных аппаратов

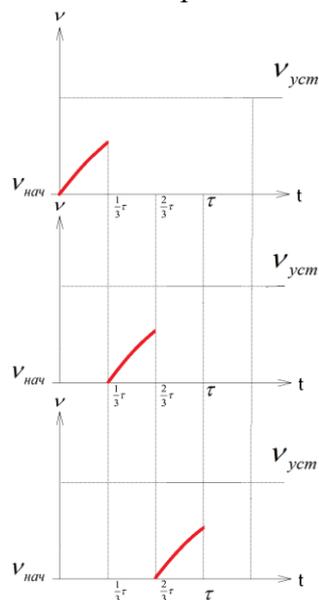


Рисунок 2 – Динамика нагрева теплоносителя при подведении тепловой энергии в импульсном режиме.

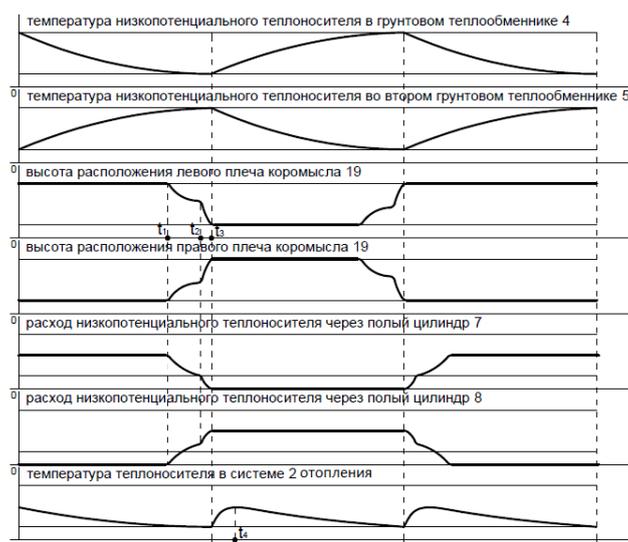


Рисунок 3 – Временная диаграмма последовательности работы элементов отопительной системы с пневматическим устройством управления грунтовыми теплообменниками

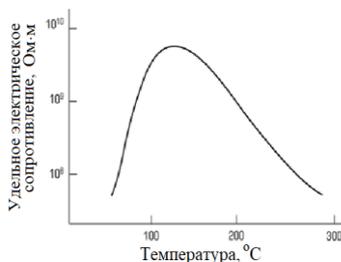


Рисунок 4 – Зависимость электрического сопротивления слоя пыли от температуры.

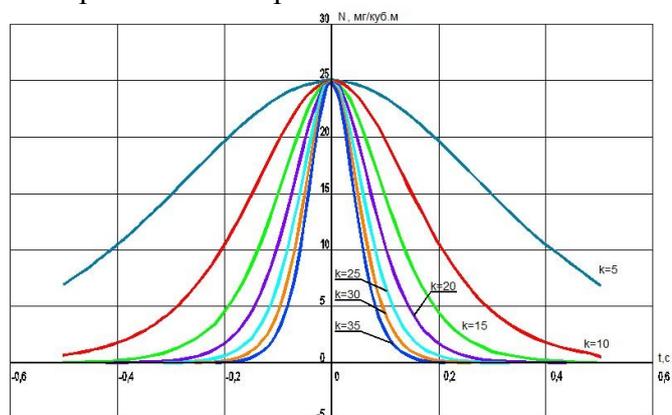


Рисунок 5 – Динамика изменения концентрации озона при различных условиях его образования и разложения

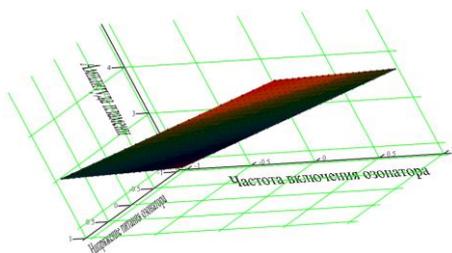


Рисунок 6 – Зависимость амплитуды пламени от напряжения питания и частоты включения озонатора.



Рисунок 7 – Зависимость излучаемой мощности передатчика от количества участков связи

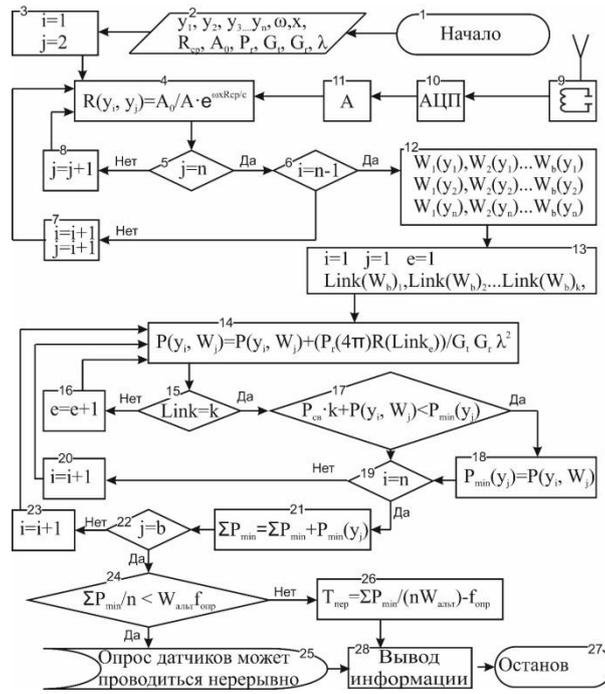


Рисунок 8 – Алгоритм работы фрагмента АСКУВ

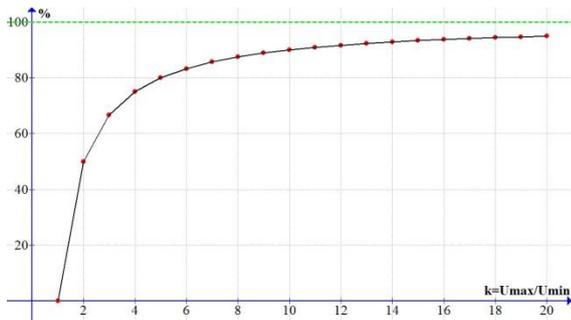


Рисунок 9 – График зависимости процентной доли использованной энергии ионистором от отношения U_{max} и U_{min}

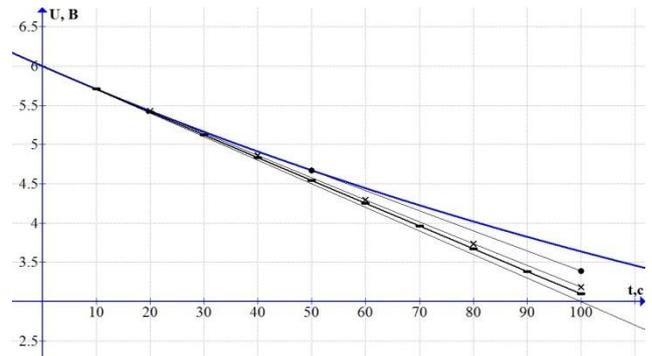


Рисунок 10 – Кривые разряда ионистора при различных нагрузках

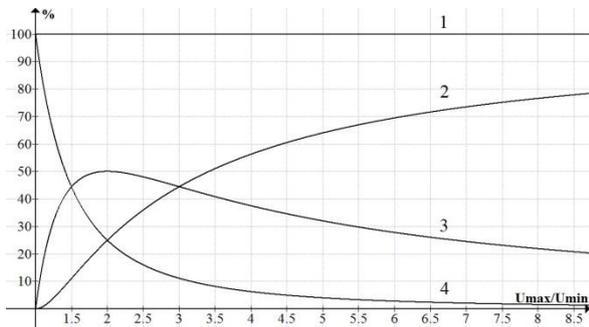


Рисунок 11 – Зависимости составляющих уравнений энергетического баланса от отношения U_{max}/U_{min} .

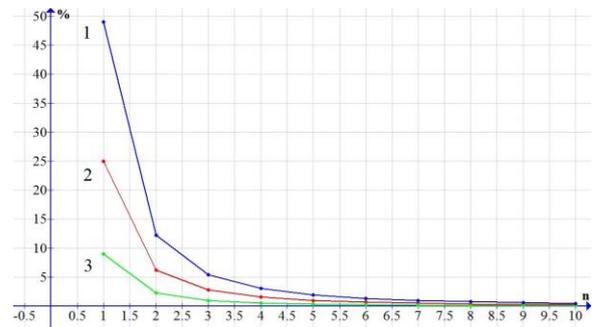


Рисунок 12 – Зависимости долей неиспользованной энергии $W_{ост}$ (%) от количества ионисторов в группе при различных значениях U_{min}

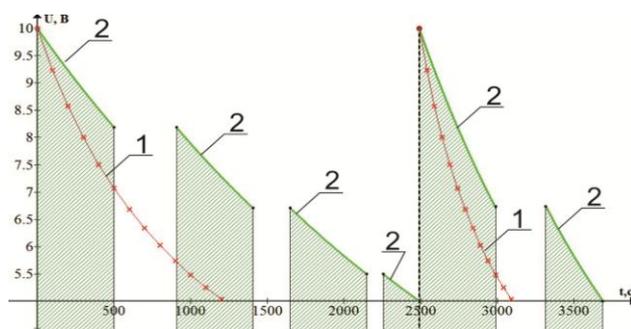


Рисунок 13 – – Графики изменения напряжения у потребителей при разряде ионисторов с использованием параметрической стабилизации и динамической коммутации

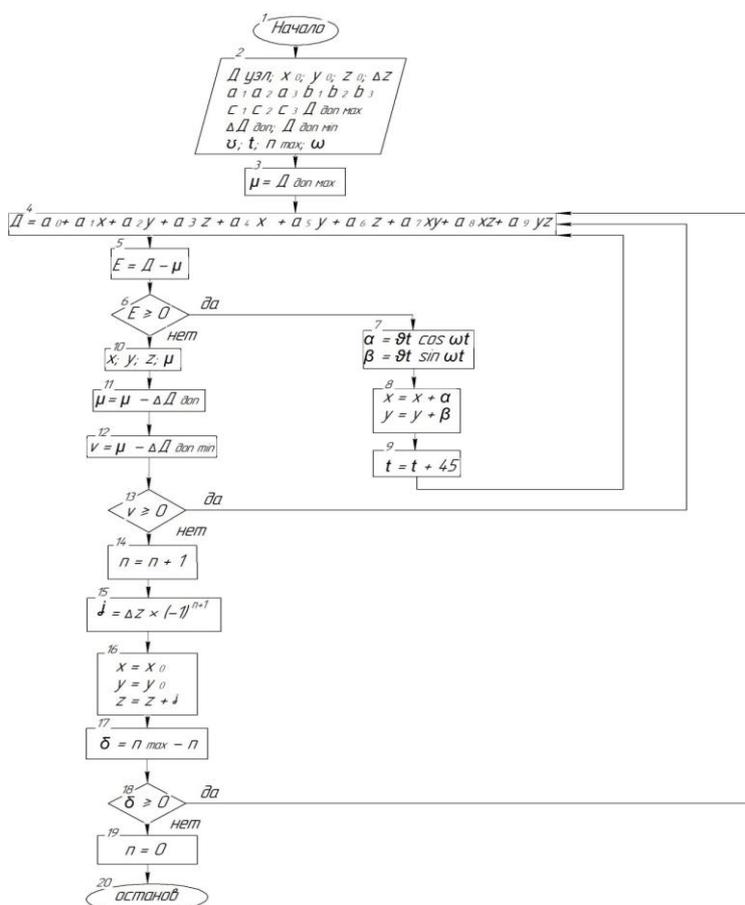


Рисунок 14 – Алгоритм машинного исследования математической модели процесса распределения напряженности поля в пространстве рабочей камеры СВЧ-установки.

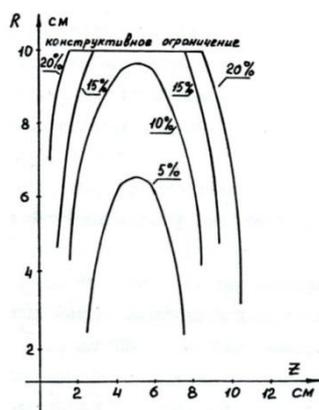


Рисунок 15 – Зависимость радиуса цилиндра от высоты расположения продукта и допустимого отклонения дозы

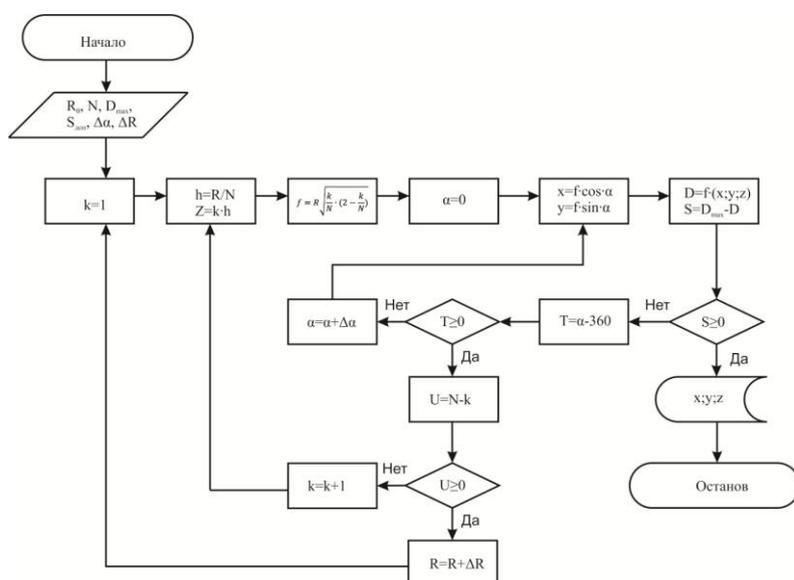


Рисунок 16 – Алгоритм расчета эквипотенциального пространства в рабочей камере

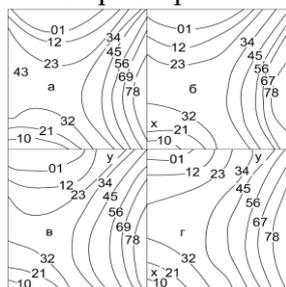


Рисунок 17 – Графики линий уровня на фиксированных высотах пространства объемного резонатора

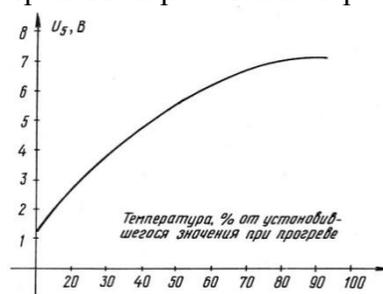


Рисунок 18 – Зависимость напряжения пятой гармонической составляющей от температуры магнетрона при нормальном режиме работы СВЧ-генератора

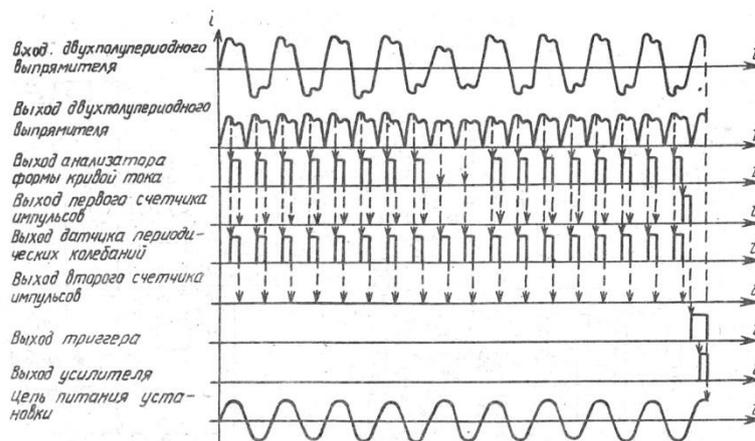


Рисунок 19 – Временная диаграмма работы устройства защиты в нормальном режиме.

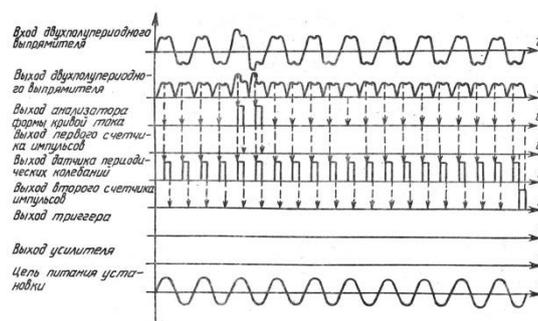


Рисунок 20 – Временная диаграмма работы устройства защиты в аварийном режиме.

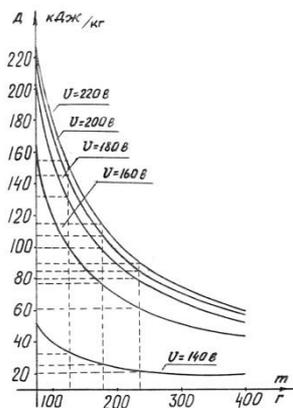


Рисунок 21 – Зависимость дозы СВЧ-воздействия от массы обрабатываемого материала и напряжения на первичной обмотке повышающего трансформатора

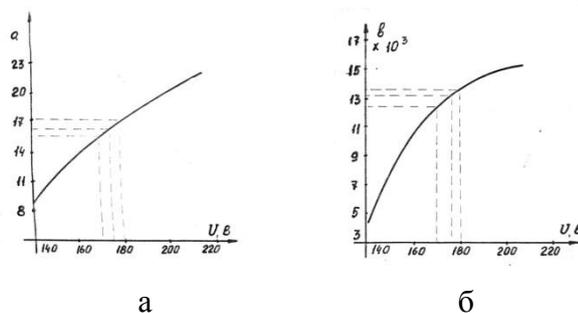


Рисунок 22 – Зависимости коэффициентов «а» (а) и «б» (б) от напряжения на первичной обмотке повышающего трансформатора

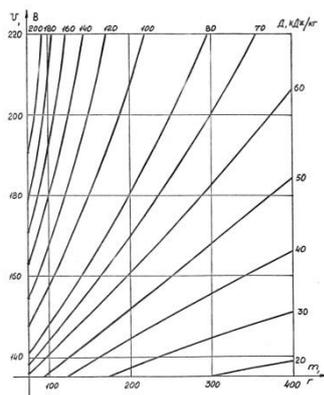


Рисунок 23 – Номограмма зависимости напряжения на первичной обмотке повышающего трансформатора от массы обрабатываемых материалов и требуемой дозы

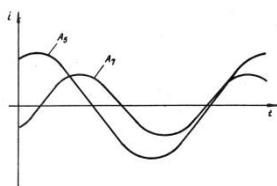


Рисунок 24 – Осциллограммы пятой и седьмой гармонических составляющих при номинальной нагрузке

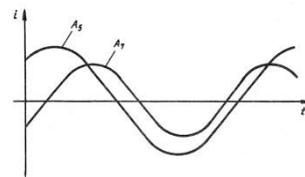


Рисунок 25 – Осциллограммы пятой и седьмой гармонических составляющих при максимальной нагрузке

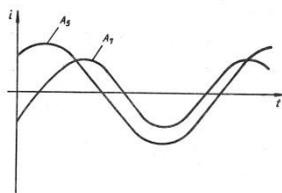


Рисунок 26 – Осциллограммы пятой и седьмой гармонических составляющих при минимальной нагрузке

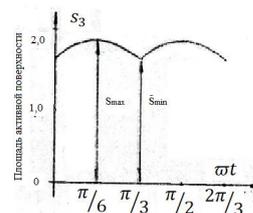


Рисунок 27 – График изменения активной поверхности лопастей

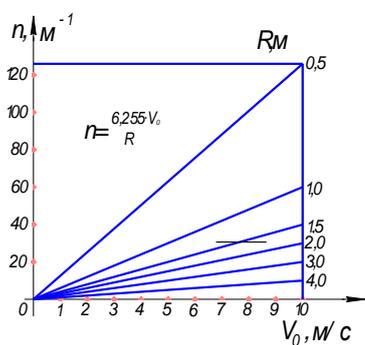


Рисунок 28 – Номограмма для определения оптимального режима работы ветродвигателя

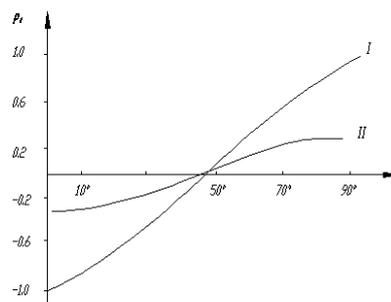


Рисунок 29 – Графики функций $P_0 = G(\sin\varphi - \cos\varphi)$ и $P_0 = G(\sin\varphi - \cos\varphi) - G\sin(\varphi - 45^\circ)$

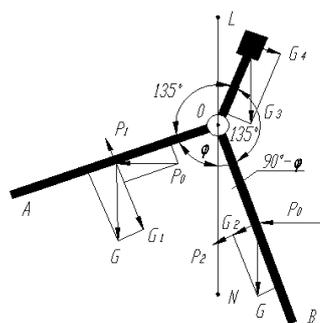


Рисунок 30 – Силы, действующие на лопасти, при наличии одного противовеса

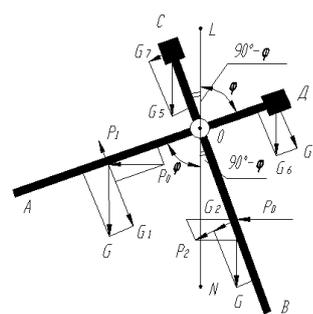


Рисунок 31 – Силы, действующие на лопасти, при наличии двух противовесов.

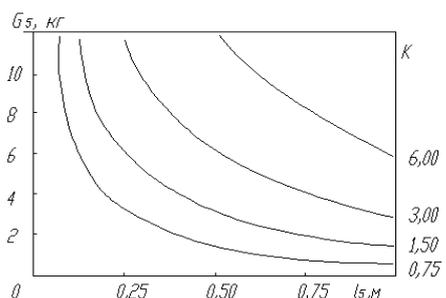


Рисунок 32 – Номограмма для определения параметров противовесов

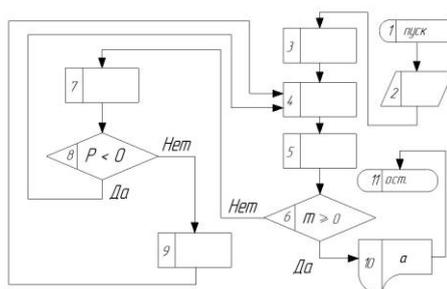


Рисунок 33 – Алгоритм компьютерного моделирования процесса вращения лопастей.

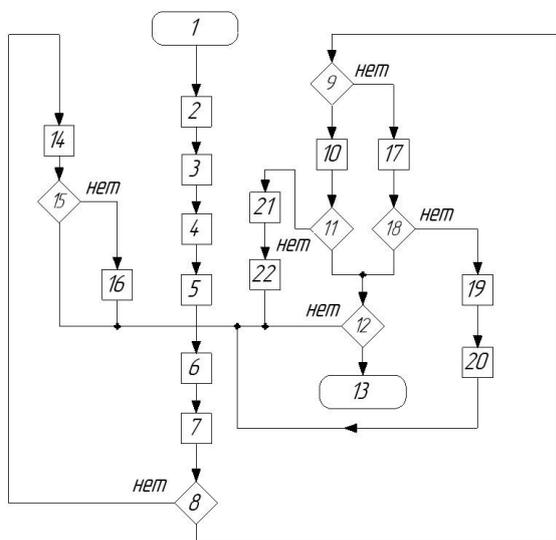


Рисунок 34 – Ускоренный алгоритм определения минимально допустимого межлопастного расстояния.

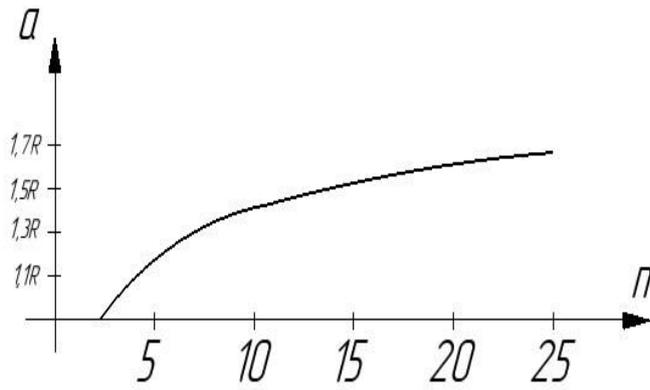


Рисунок 35 – Зависимость $a = f(n)$ для диапазона $2 \leq n \leq 25$

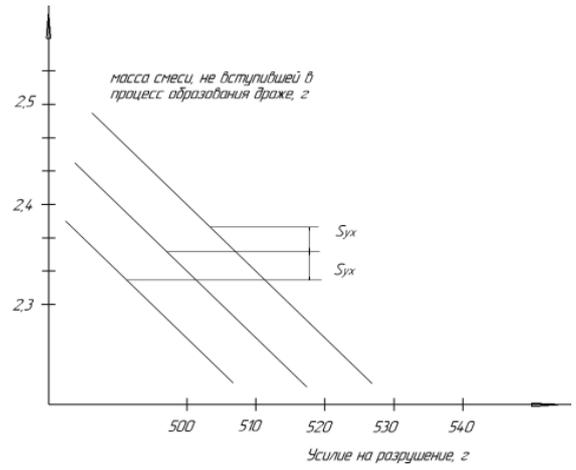


Рисунок 36 – Теоретическая линия регрессии на корреляционном поле с экспериментальными данными.

Приложение В – Функциональные и принципиальные схемы, фотографии

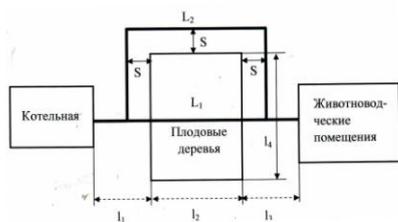


Рисунок 1 – Схема расположения теплотрасс

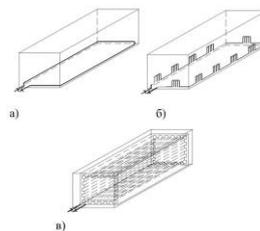
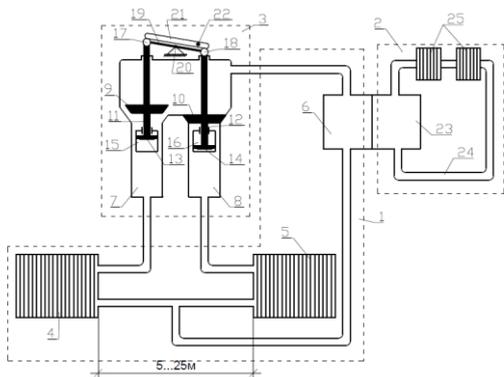
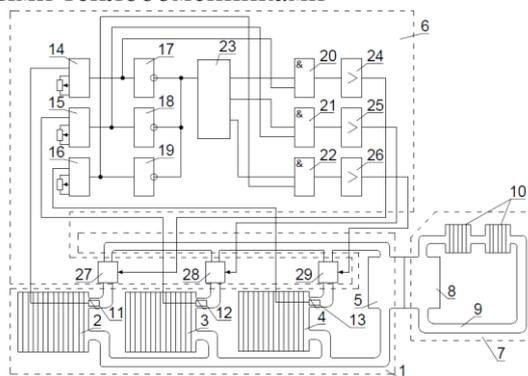


Рисунок 2 – Примеры выполнения конвективной системы отопления



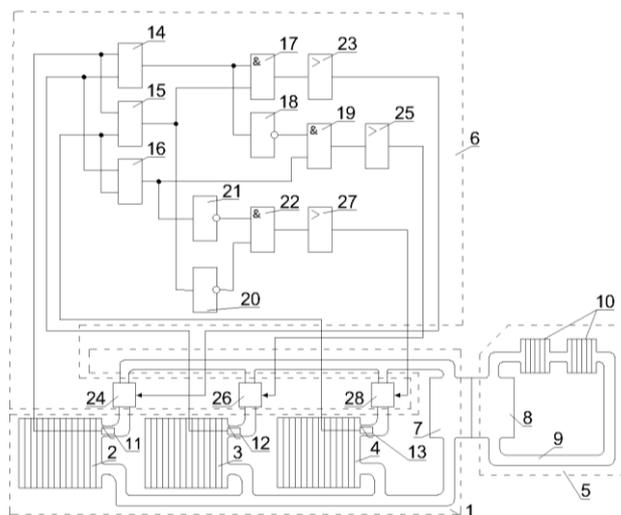
1 – контур циркуляции низкопотенциального теплоносителя; 2 – контур отопления; 3 – устройство управления грунтовыми теплообменниками; 4,5 – первый и второй грунтовые теплообменники соответственно; 6 – испаритель теплового насоса; 7, 8 – полые цилиндры; 9,10 – конусообразные клапаны; 11,12 – штоки поршней; 13,14 – днища поршней; 15,16 – герметичные сосуды; 17,18 – шарнирные связи; 19 – коромысло; 20 – ось коромысла; 21 – герметичная трубка; 22 – шарик; 23 – конденсатор теплового насоса; 24 – трубопровод; 25 – отопительные приборы.

Рисунок 3 – Функциональная схема отопительной системы с пневматическим устройством управления грунтовыми теплообменниками



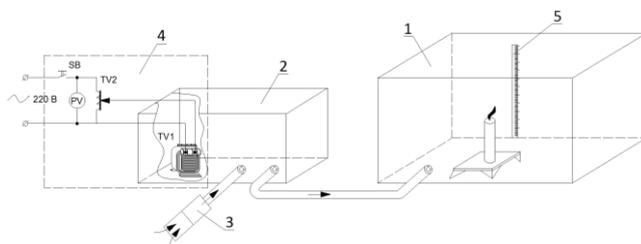
1 – контур циркуляции низкопотенциального теплоносителя; 2,3,4 – первый, второй и третий грунтовые теплообменники соответственно; 5 – испаритель теплового насоса; 6 – устройство управления; 7 – контур отопления; 8 – конденсатор теплового насоса; 9 – трубопровод; 10 – отопительные приборы; 11,12, 13 – датчики температуры; 14,15, 16 – компараторы; 17, 18, 19 – инверторы; 20,21,22 – логические элементы «И»; 23 – кольцевой счетчик; 24,25,26 – усилители; 27,28, 29 – электромагнитные клапаны

Рисунок 4 – Функциональная схема отопительной системы с электронным устройством управления грунтовыми теплообменниками



1 – контур циркуляции низкопотенциального теплоносителя; 2,3,4 – первый, второй и третий теплообменники соответственно; 5 – контур отопления; 6 – устройство управления; 7 и 8 – испаритель и конденсатор теплового насоса соответственно; 9 – трубопровод; 10 – отопительные приборы. 11,12,13 – первый, второй и третий датчики температуры соответственно; 14,15,16 – первый, второй и третий компаратор соответственно; 17 – первый логический элемент «И», 18 – инвертор; 19 – второй логический элемент «И»; 20 – третий инвертор; 21 – второй инвертор; 22 – третий логический элемент «И», 23 – первый усилитель; 24 – первый электромагнитный клапан; 25 – второй усилитель; 26 – второй электромагнитный клапан; 27 – третий усилитель; 28 – третий электромагнитный клапан.

Рисунок 5 – Функциональная схема отопительной системы с гибким алгоритмом управления грунтовыми теплообменниками



1-имитационная топочная камера; 2-источник озона; 3-нагнетатель воздуха; 4-блок питания; 5-линейка.

Рисунок 6 – Функциональная схема экспериментальной установки.



Рисунок 7 – Фотография усовершенствованной экспериментальной установки

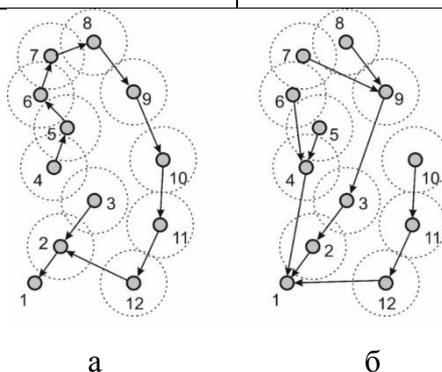


Рисунок 10 – Варианты самоорганизации сети



Рисунок 11 – Лабораторный стенд для исследования параметров вихревой дорожки Кармана

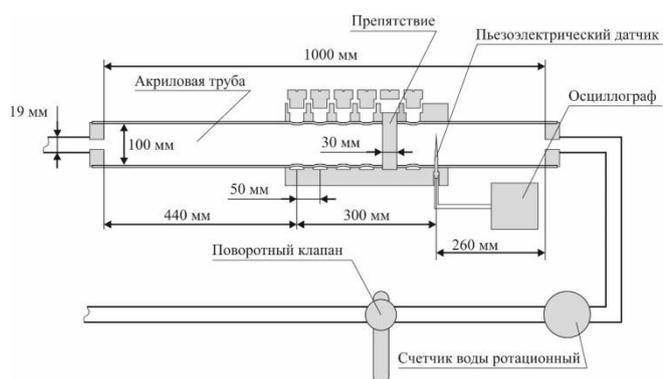


Рисунок 12 – Схема лабораторного стенда для исследования параметров вихревой дорожки Кармана

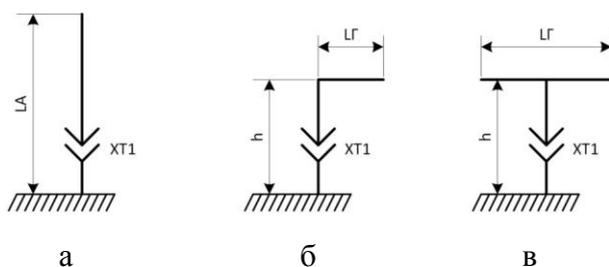


Рисунок 13 – Эскиз вертикальной антенны с заземлением

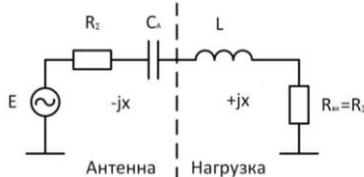


Рисунок 14 – Эквивалентная схема антенны с удлиняющей катушкой индуктивности

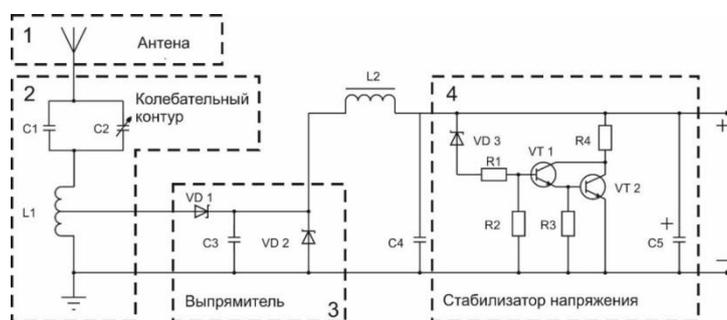


Рисунок 15 – Принципиальная электрическая схема блока автономного питания ИПУ

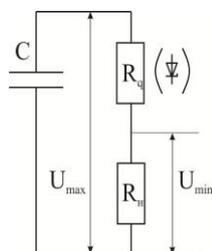


Рисунок 16 – Схема замещения цепи разряда ионистора

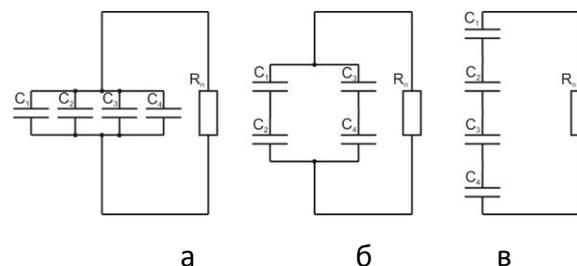


Рисунок 17 – Схемы соединения ионисторов при динамической коммутации

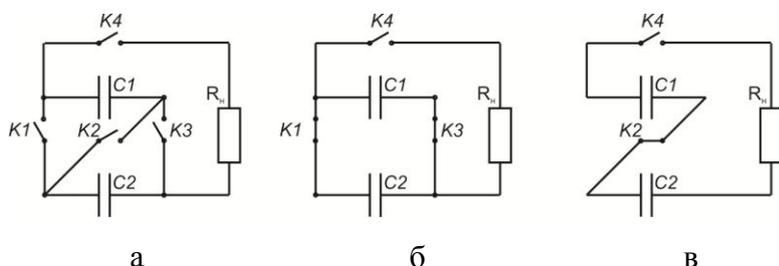


Рисунок 18 – Схема контактного аналога динамической коммутации ионисторов

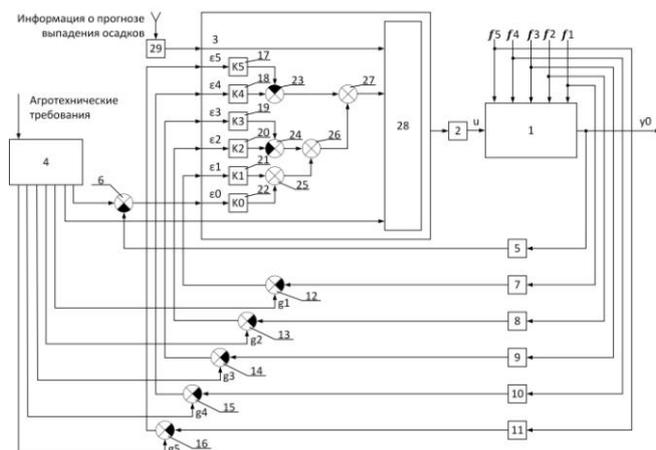
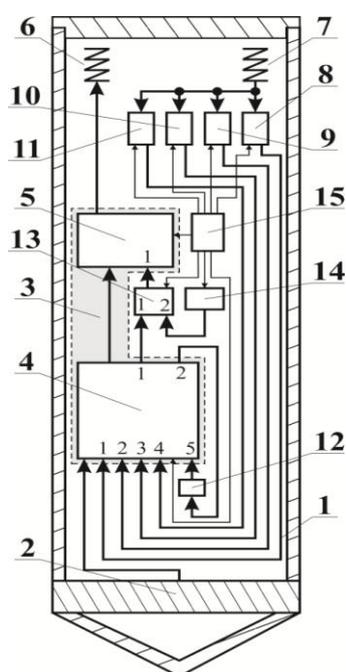


Рисунок 19 – Функциональная схема системы управления поливом



1 – корпус; 2 – датчик влажности; 3 – измерительно-передающая часть; 4 – микропроцессор; 5 – радиомодуль; 6 – антенна; 7 – приемная антенна; 8 – приемник управляющих сигналов; 9 – приемник эталонных сигналов; 10 – приемник ответных сигналов; 11 – приемник информации о влажности почвы от внешнего устройства; 12 – твердотельный накопитель; 13 – коммутатор; 14 – генератор эталонных сигналов; 15 – источник питания

Рисунок 20 – Функциональная схема беспроводного устройства для контроля влажности почвы

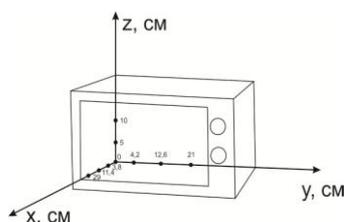


Рисунок 21 – Расположение исследуемых точек в пространстве рабочей камеры

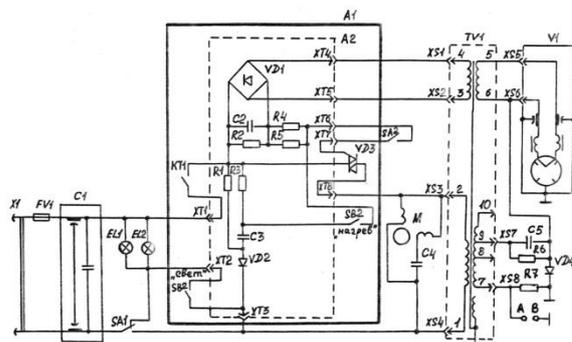
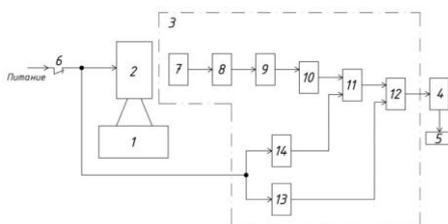


Рисунок 22 – Принципиальная электрическая схема СВЧ-генератора КБН-82



1 – рабочая камера; 2 – СВЧ-генератор; 3 – датчик аварийного режима; 4 – усилитель мощности; 5 – реле; 6 – размыкающие контакты реле; 7 – катушка индуктивности; 8 – фильтр низких частот; 9 – усилитель; 10 – пороговый элемент; 11 – логический элемент «И», 12 – триггер; 13 и 14 – элементы задержки времени.

Рисунок 23 – Функциональная схема микроволновой установки с защитой по уровню низкочастотного излучения.

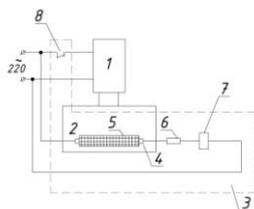
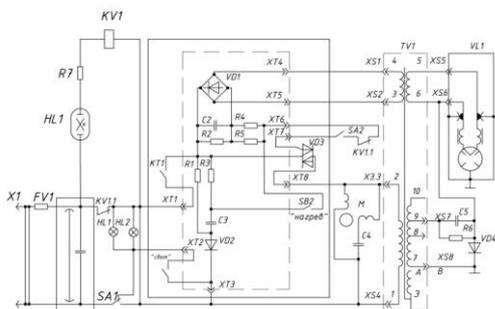
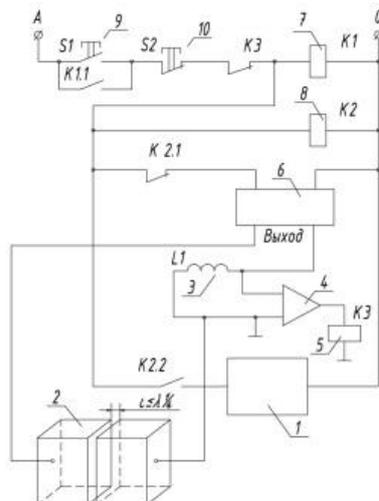


Рисунок 24 – Функциональная схема микроволновой установки с устройством защиты на эффекте ионизации газа



1 – СВЧ-генератор; 2 – рабочая камера; 3 – устройство защиты; 4 – первичный преобразователь (газоразрядная лампа низкого давления); 5 – реле; 6 – резистор; 7 – реле; 8 – нормально замкнутые контакты реле 7.

Рисунок 25 – Принципиальная электрическая схема микроволновой установки с устройством защиты на эффекте ионизации газа



1 – СВЧ-генератор; 2 – резонатор; 3 – катушка индуктивности; 4 – усилитель; 5 – реле; 6 – высокочастотный генератор; 7 – дополнительное реле; 8 – реле времени; 9 и 10 – замыкающая и размыкающая кнопки соответственно

Рисунок 26 – Принципиальная электрическая схема микроволновой установки с устройством защиты на емкостном принципе

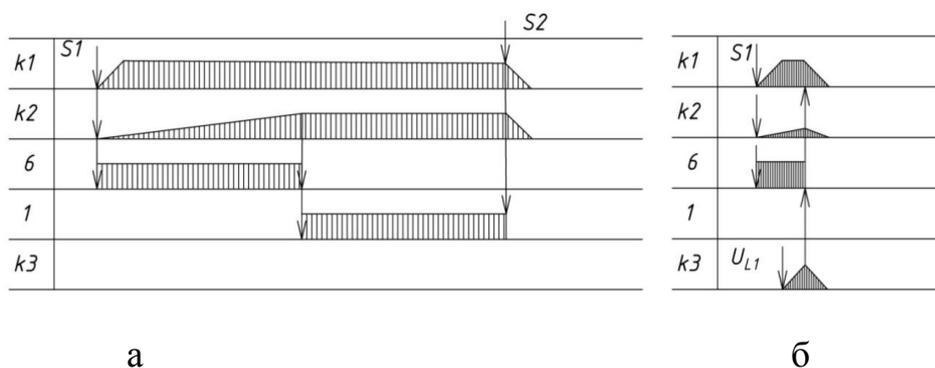
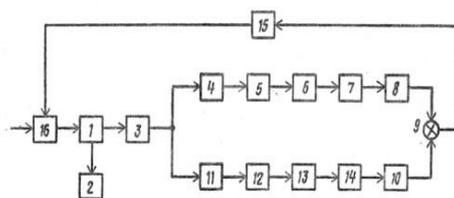


Рисунок 27 – Временная диаграмма работы микроволновой установки для при нормальном (а) и аварийном (б) режимах



1 – магнетрон; 2 – рабочая камера; 3 – первый усилитель ; 4 – режекторный фильтр; 5 – первый согласующий каскад; 6 – первый полосовой фильтр; 7 – второй усилитель; 8 – детектор; 9 – сумматор; 10 – второй детектор; 11 – второй режекторный фильтр; 12 – согласующий каскад; 13 – полосовой фильтр; 14 – третий усилитель; 15 – усилитель мощности; 16 – регулятор

Рисунок 28 – Функциональная схема микроволновой установки с устройством регулирования режимами работы СВЧ-генератора

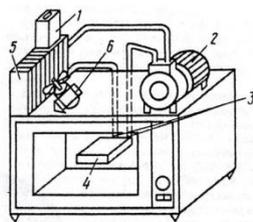


Рисунок 29– Функциональная схема переоборудованной микроволновой установки периодического действия

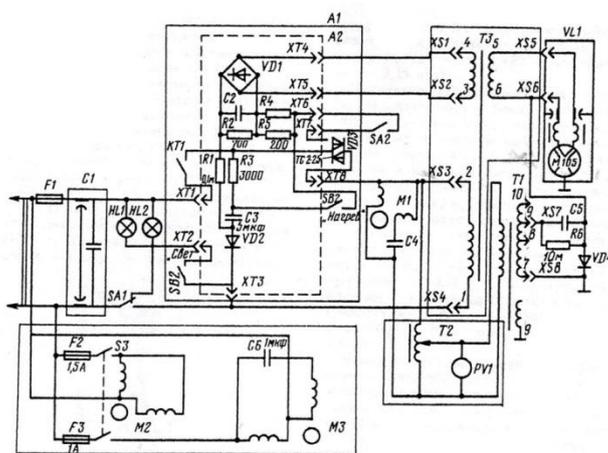


Рисунок 30 – Принципиальная электрическая схема переоборудованной микроволновой установки периодического действия

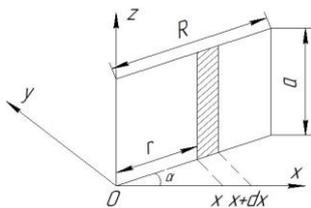


Рисунок 31 – Расположение лопасти ветродвигателя в пространстве

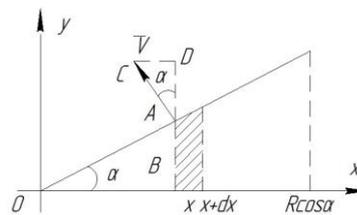


Рисунок 32 – Изображение лопасти в плане (на плоскости YOZ)

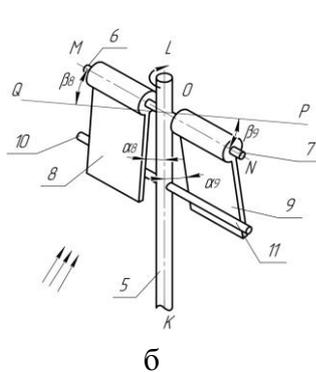
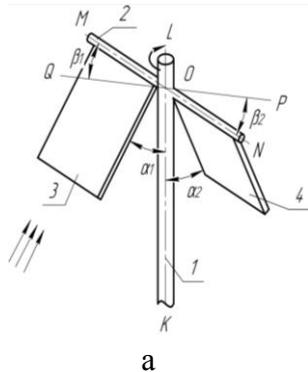


Рисунок 33 – Общие виды ветродвигателей со взаимно-перпендикулярными валами: а – по заявке Великобритании № 2196699, б – по заявке Польши № 265323.

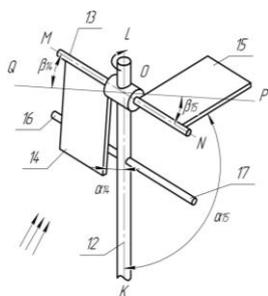


Рисунок 34 – Общий вид усовершенствованного ветродвигателя

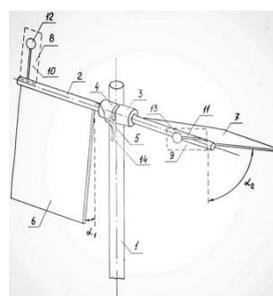


Рисунок 35 – Общий вид ветродвигателя с периодически меняющейся активной поверхностью лопастей и уравнивающей системой.

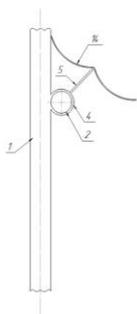


Рисунок 36 – Расположение упругой пластинки

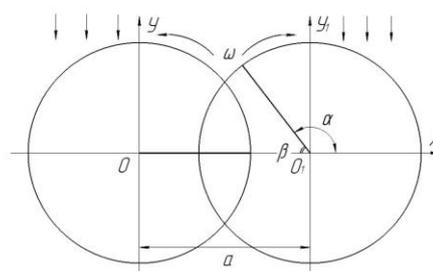


Рисунок 37 – План размещения лопастей при повороте на угол ωt

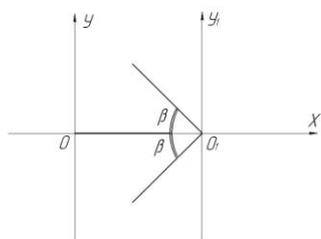


Рисунок 38 – Оптимальное расположение многолопастных элементов

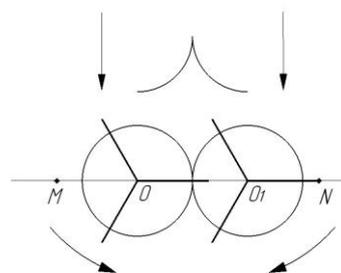


Рисунок 39 – Схема размещения заградительного экрана.

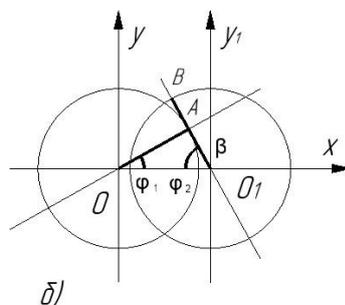
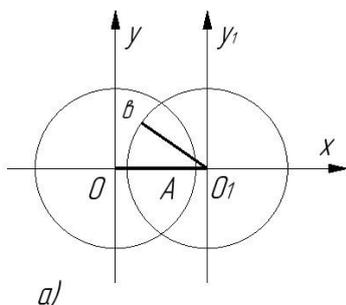
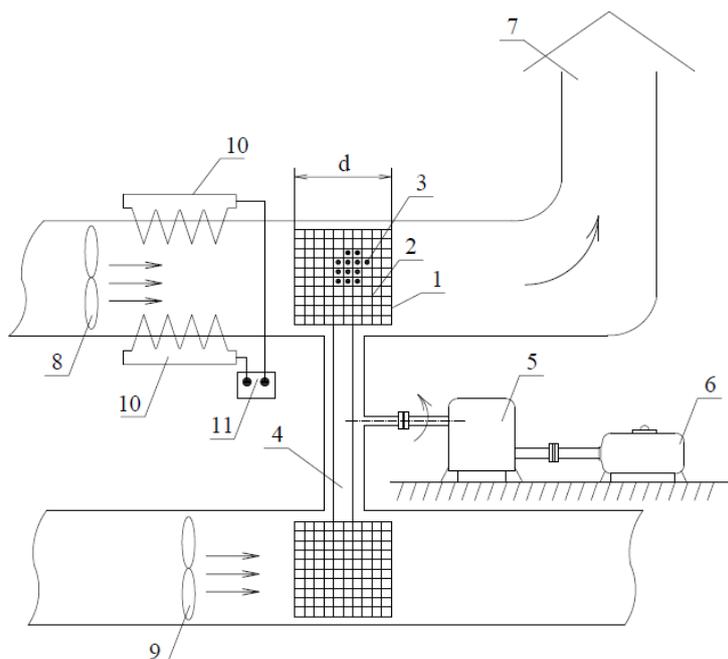


Рисунок 40 – Схематичные представления лопастей вращающимися векторами



1 – адсорбционный барабан; 2 – решетчатый корпус; 3 – силикагель; 4 – металлический диск; 5 – редуктор; 6 – электродвигатель; 7 – паропровод; 8 и 9 – вентиляторы; 10 – электро-озонатор; 11 – высоковольтный источник

Рисунок 41 – Функциональная схема адсорбционного осушителя воздуха с озоно-воздушным сушильным агентом

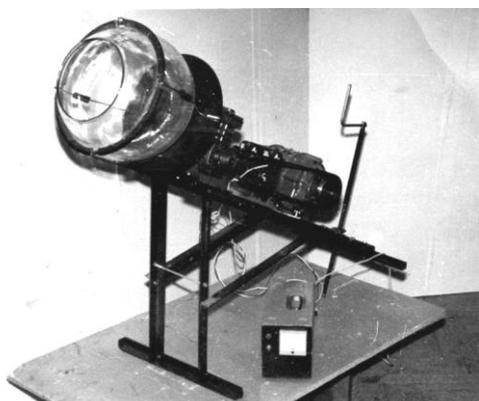


Рисунок 42 – Экспериментальный дражиратор

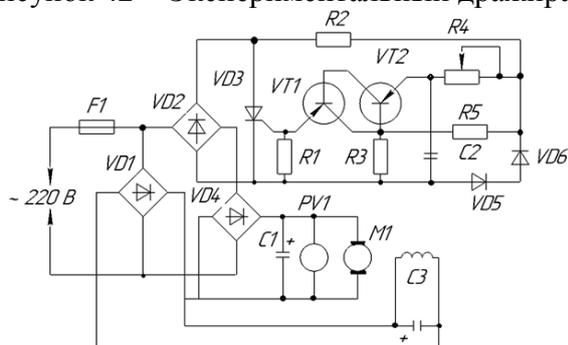


Рисунок 43 – Принципиальная электрическая схема регулятора

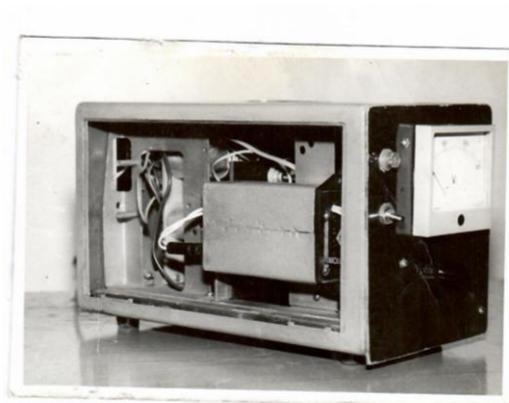


Рисунок 44 – Общий вид регулятора частоты вращения рабочего органа

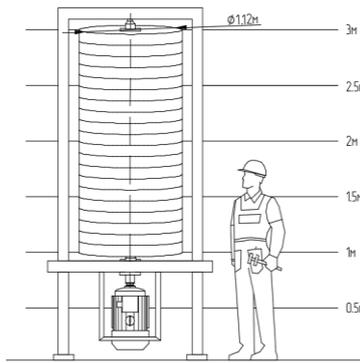


Рисунок 45 – К оценке относительных размеров стального цилиндрического маховика

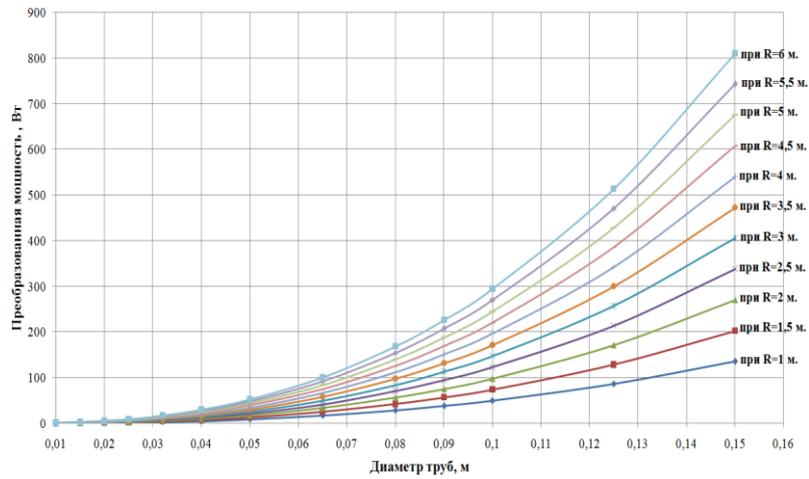


Рисунок 46 –Зависимость преобразованной мощности от диаметра труб и высоты подъема воды.

Приложение Г. Акты внедрения результатов научных исследований

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательской и инженерно-конструкторской работы, осуществленной аспирантом Флегонтовым Евгением Александровичем, профессором Андреевым Сергеем Андреевичем и профессором Судником Юрием Александровичем в производство

Настоящим актом подтверждается, что результаты научно-исследовательской и инженерно-конструкторской работы, осуществленной аспирантом Флегонтовым Евгением Александровичем, профессором Андреевым Сергеем Андреевичем и профессором Судником Юрием Александровичем, составляющие суть патентов и № 140455 U1, МПК F24D3/08 (2006/01) по заявке № 2013147025, опубл. 10.05.2014, и №149505 U1, МПК F24D12/02 (2006.01) по заявке № 2014119706 от 16.05.2014, опубл. 10.01.2015, а также содержание публикаций вышепоименованных авторов в Международном научном журнале и других изданиях РФ, были предоставлены Закрытому акционерному обществу «Компания «СвязьИнТех» (125635, Москва, ул. Ангарская, д.б, ОГРН 1027719011924, ИНН 7719258347, КПП 774301001, ОКПО 59707433), являющемуся официальным представителем фирмы NIBE Energy System, для использования при проектировании и монтажу системы обогрева теннисного корта по адресу: Московская область, Истринский район, с/п Павло-Слободское.

Технические решения, отраженные в переданных документах, а именно: способ эффективного извлечения теплоты грунта посредством поочередного подключения теплообменников к испарительным контурам тепловых насосов, а также технические средства для его осуществления были реализованы Закрытому акционерному обществу «Компания «СвязьИнТех» на вышеуказанном объекте и показали свою эффективность.

Внедрение результатов научно-исследовательской и инженерно-конструкторской работы Флегонтова Е.А., Андреева С.А. и Судника Ю.А. позволило обеспечить тепловой энергией теннисный корт в соответствии с требованиями заказчика и сократить затраты электроэнергии на 28% без нанесения экологического ущерба.

Проведение научно-исследовательской и инженерно-конструкторской работы осуществлялось в рамках договора о творческом сотрудничестве между временным авторским коллективом в составе Флегонтова Е.А., Андреева С.А. и Судника Ю.А., представляющих кафедру «Автоматизация и роботизация технологических процессов имени академика И.Ф.Бородина» ФГБОУ ВО «Российский аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А.Тимирязева» и Закрытому акционерному обществу «Компания «СвязьИнТех» № 2 от 12 мая 2014 года.

Никаких финансовых и имущественных претензий друг к другу сотрудничающие стороны не имеют.

Генеральный директор «Компания «СвязьИнТех»»

Н.Ю.Игнатьева

От временного коллектива авторов
технического решения





ЭнергоСтандарт

Общество с ограниченной ответственностью

111024, г. Москва, Перовский пр-д, д.35, стр. 12, оф. 4, ИНН 7718303540, КПП 772201001
 E-mail: info@energostandart.ru; тел.: +7(495) 185-00-03, +7(929)936-73-50; факс: +7(495) 185-00-04

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом ООО «Энергостандарт» подтверждает использование на своих объектах в МО, г. Лобня научно-технических достижений, защищенных патентами Российской Федерации

№ 147360, заявл. 28.04.2014, опубл. 10.11.2011,

№ 155165, заявл. 13.01.2015, опубл. 27.09.2015,

№ 2627546, заявл. 18.05.2016, опубл. 08.08.2017,

№ 189080, заявл. 06.02.2019, опубл. 13.05.2019.

Использованные научно-технические достижения охватывают области дистанционного контроля производственно-важных параметров, предварительной обработки, записи и передачи данных по беспроводным линиям связи, использования ионисторов в качестве накопителей электрической энергии для автономного питания микропроцессорных и приемо-передающих устройств, а также применения самообучающихся и самоорганизующихся систем автоматического выбора и реализации оптимальной траектории движения информационных сигналов.

Авторы и патентообладатели указанных правоохранных документов не претендуют на получение материального вознаграждения, не преследуют коммерческих целей, не являются выгодополучателями и готовы к дальнейшему сотрудничеству в создании новых энерго-ресурсосберегающих мероприятий.

Генеральный директор
 ООО «Энергостандарт»
 (должность)

Авторы внедренных технических решений



(подпись)

(подпись)

(подпись)

Т. А. Воевода
 (Ф. И. О.)

С.А. Андреев
 (Ф. И. О.)

А.И. Матвеев
 (Ф. И. О.)

«31» июля 2019 года

Документ 2 – Акт внедрения результатов НИР по совершенствованию средств контроля количества потребленной жидкости и беспроводному контролю влажности почвы

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательской и учебно-методической работы,
осуществленной аспирантом Матвеевым Андрисом Илмаровичем и доцентом
Андреевым Сергеем Андреевичем в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается, что результаты научно-исследовательской и учебно-методической работы осуществленной аспирантом Матвеевым Андрисом Илмаровичем и доцентом Андреевым Сергеем Андреевичем, составляющие суть патентов №147360 U1, МПК G01F1/075 (2006.01) по заявке №2014116863/28, №155165 U1, МПК G01F1/00 (2006.01) по заявке №2015100179/28, №2627546 C1, МПК G01F1/06 (2006.01) по заявке №2016119238 и №2622695 C1, МПК A01G25/16 (2006.01) по заявке №2016100223, а также содержание публикаций вышепоименованных авторов в Международном научном журнале и других изданиях РФ были предоставлены ФГБОУ ВО Тверская ГСХА на кафедру «Технической эксплуатации автомобилей» инженерного факультета (170904, Тверская область, г. Тверь, ул. Маршала Василевского (Сахарово), д. 7) для использования в учебном процессе по дисциплине «Гидравлика»

Программные решения, отраженные в переданных документах, а именно: двухмерное моделирование течения жидкости через препятствие с применением метода решетчатых уравнений Больцмана, а также технические средства для его осуществления были реализованы ФГБОУ ВО Тверская ГСХА на вышеуказанном объекте и показали свою эффективность.

Внедрение результатов научно-исследовательской и учебно-методической работы Матвеева А.И. и Андреева С.А. в учебный процесс позволило организовать лабораторные работы по исследованию процессов вихреобразования в трубопроводах, повысить наглядность учебного процесса и снизить затраты электроэнергии и воды по сравнению с использованием традиционного лабораторного оборудования на 40%.

Проведение научно-исследовательской и учебно-методической работы осуществлялось в рамках договора о творческом сотрудничестве между временным авторским коллективом в составе Матвеева А.И. и Андреева С.А., представляющих кафедру автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф.Бородина ФГБОУ ВО РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА и кафедрой технической эксплуатации автомобилей инженерного факультета ФГБОУ ВО Тверская ГСХА. Решение заседания кафедры технической эксплуатации автомобилей ТГСХА №9 от 14 мая 2018 года.

Никаких финансовых и имущественных претензий друг к другу сотрудничающие стороны не имеют.

Заведующий кафедрой технической
эксплуатации автомобилей ТГСХА



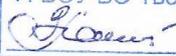
Панов Юрий Алексеевич

От временного коллектива авторов
технического решения



Матвеев Андрис Илмарович



ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
Ученый секретарь
Ученого совета
ФГБОУ ВО Тверская ГСХА
 Володыкина Г.М.

Документ 3 – Акт внедрения результатов НИР по двухмерному моделированию течения жидкости через трубопроводу с препятствием

Общество с ограниченной ответственностью

ТехноПромСервис

18 июля 2013 года

634063, г.Томск, ул.Ивана Черных, д.65
ИНН/КПП 7017337675/701701001

АКТ ПЕРЕДАЧИ результатов научно-исследовательской работы

В соответствии с настоящим актом передачи результатов научно-исследовательской работы творческий коллектив сотрудников ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П.Горячкина», именуемый в дальнейшем ИСПОЛНИТЕЛЬ, в составе Андреева Сергея Андреевича, Судника Юрия Александровича и Петровой Елены Алексеевны передал, а проектный отдел ООО «ТехноПромСервис», именуемый в дальнейшем ЗАКАЗЧИК, принял результаты экспериментально-теоретических исследований воздействия озона на горение природного газа, опытно-конструкторскую документацию на изготовление котла с озоновым наддувом и количественные характеристики режимов его эксплуатации.

ЗАКАЗЧИК оставляет за собой право использования результатов научно-исследовательской работы в производственных, в том числе, в коммерческих целях, последующего уточнения количественных характеристик эксплуатации котла, а также изменения конструкции котла с озоновым наддувом в соответствии с конъюнктурой рынка и требованиями производителя – ЗАО «Термофор», н.Новосибирск.

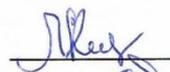
ЗАКАЗЧИК обязуется информировать ИСПОЛНИТЕЛЯ обо всех фактах использования полученных результатов научно-исследовательской работы в конструкциях серийно выпускаемых котлов, об отзывах потребителей и рекламациях сервисных центров.

ЗАКАЗЧИК обязуется беспрепятственно информировать третьих лиц об участии ИСПОЛНИТЕЛЯ в разработке газового котла с озоновым наддувом, а также патентовать или публиковать информацию о результатах научно-исследовательской работы, переданной по настоящему акту, в открытой печати только с письменного согласия ИСПОЛНИТЕЛЯ..

ИСПОЛНИТЕЛЬ не претендует на материальное вознаграждение за производственное использование результатов научно-исследовательской работы по настоящему акту передачи.

ОТ ЗАКАЗЧИКА
Генеральный директор
ООО «ТехноПромСервис»
ОТ ИСПОЛНИТЕЛЯ



 Кизицкая Л.М.
 Андреев С.А.

Документ 4 – Акт внедрения результатов НИР проектным отделом ООО «ТехноПромСервис» о принятии результатов экспериментально-теоретических исследований воздействия озона на горение природного газа