

Казахский Национальный Исследовательский Технический Университет имени
К.И.Сатпаева

УДК 681.5:523.3:541.13 (043)

На правах рукописи

ТОЙГОЖИНОВА АЙНУР ЖУМАКАНОВНА

**Исследование и разработка автоматизированной установки озонирования
воздуха**

6D070200 – Автоматизация и управление

Диссертация на соискание ученой степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант
кандидат технических наук,
ассистент-профессор
Кошимбаев Ш.К.

Зарубежный научный консультант
Prof. Dr. hab. inz.
(доктор технических наук, профессор)
Waldemar Wojcik

Алматы 2017

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	4
ОПРЕДЕЛЕНИЯ	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОЗОНИРОВАНИЕМ ВОЗДУХА ПРИ ОБРАБОТКЕ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ	14
1.1 Существующие методы и способы дезинфекции и санации озонирования воздуха для дезинфекции рабочей атмосферы в производственных помещениях	14
1.2 Современное состояние исследований по автоматизации процесса озонирования воздуха	19
1.3 Современное состояние исследования и разработок автоматизированных систем и установок для промышленного применения озона	26
1.4 Обоснование направления исследований и общей методики проведения научно-исследовательской работы	28
1.5 Выводы по разделу	30
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И РАЗРАБОТКА ОЗОНАТОРОВ НА ОСНОВЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА МИКРОЭЛЕКТРОДАХ ..	31
2.1 Обоснование и выбор способа и метода расчета параметров в озонаторах коронного разряда	31
2.2 Исследование характеристик озонирующего элемента при пониженных давлениях воздуха и разработка озонатора	50
2.3 Разработка озонатора с питанием высоковольтных импульсов напряжения для автоматического регулирования концентрации озона ...	63
2.4 Обоснование режимов озонирования в процессе обработки в производственных помещениях	67
2.5 Выводы по разделу	69
3 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ОЗОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА	70
3.1 Получение адаптивной прогнозирующей модели ТП озонирования	70
3.2 Идентификация и управление ТП озонирования	73
3.3 Синтез оптимального регулятора адаптивной систем управления ТП озонирования	82
3.4 Разработка блока автоматического регулирования частоты генератора озона	87
3.5 Выводы по разделу	95
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ ОЗОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА	96

4.1 Экспериментальное определение производительности и удельного энергетического выхода озона	96
4.2 Оценка структуры и параметров адаптивной прогнозирующей модели ТП озонирования при использовании активной идентификации . .	105
4.3 Оценка адекватности адаптивной прогнозирующей модели и нестационарного динамического технологического процесса озонирования	116
4.4 Оценка технико-экономического эффекта озонирования с автоматическим контролем и регулированием концентраций озона	127
4.5 Выводы по разделу	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.	133
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Программа управления БАРЧ в режиме «МК»	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Электрическая схема внутренних соединений БАРЧ	144
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Акт внедрения результатов диссертационной работы.	145
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Акт производственных испытаний автоматизированной установки озонирования воздуха	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Удостоверение автора изобретения	149
ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Удостоверение автора полезной модели	150
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж – Предпатент. Способ усиления электрического тока в озонаторе	151
ПРИЛОЖЕНИЕ З – Инновационный патент. Озонатор.	153
ПРИЛОЖЕНИЕ И – Инновационный патент. Устройство для контроля и регулирования концентраций озона в закрытом объеме.	155
ПРИЛОЖЕНИЕ К – Патент на полезную модель. Озонирующий элемент	157
ПРИЛОЖЕНИЕ Л – Справка о выполнении научно-экспериментальных работ диссертационного исследования	159

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

«Инструкция по оформлению диссертации и автореферата», Высший аттестационный комитет. – Алматы, 2004 г., №377-3 ж.

ГОСТ 7.32 - 2001 – Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. «Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления». – Астана, 2001 г.

ГОСТ 7.1 – 2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Озон – газ (O_3), модификация кислорода, обладающий сильными окислительными свойствами, нестабильное соединение, медленно распадающееся на молекулярный кислород.

Озонатор – прибор, вырабатывающий озон из кислорода, содержащегося в атмосферном воздухе. Прямоточный озонатор – озонатор, вырабатывающий озон из воздуха, забираемого непосредственно из помещения, где он установлен.

Концентрация озона – масса озона, содержащегося в единице объема газа, измеряется в единицах: мкг/л, мг/м³, г/м³. Равновесная концентрация озона – концентрация озона, установившаяся в помещении при длительной работе в нем озонатора.

Озонирование – обработка воздуха в помещении озонатором. Абсолютная влажность воздуха – масса паров воды, содержащихся в единице объема воздуха, измеряется в г/м³.

Максимальная абсолютная влажность воздуха – максимальная масса паров воды, которая может находиться в воздухе при данной температуре; чем больше температура воздуха, тем больше максимальная абсолютная влажность.

Относительная влажность воздуха – содержание паров воды в воздухе по отношению к максимальной абсолютной влажности воздуха при данной температуре (зависит от температуры), измеряется в процентах, %.

Детоксикация – удаление из воздуха токсичных веществ.

Санация – удаление из воздуха и поверхностей патогенных микроорганизмов, вызывающих болезни у животных и человека.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

U, E – напряжение и напряжённость электрического поля;
 U_0, E_0 – начальные напряжения и напряжённости поля короны;
 I, φ – электрический ток и потенциал;
 K – подвижности ионов;
 U_i – потенциал ионизации атома и молекул;
 α, γ – ионизационные коэффициенты Таунсенда;
 $\epsilon_0, \epsilon, \nu$ – диэлектрическая постоянная, энергия и частота столкновений электрона;
 σ, τ – плотность поверхностных и линейных зарядов;
 T, p, δ – температура, давление, относительная плотность воздуха;
 r_0, d – радиусы и диаметры коронирующей проволоки;
ОВИ – озонатор высоковольтных импульсов;
ОКР – озонатор на коронном разряде;
ВЧ – высокочастотный;
ПДК – предельно допустимые концентрации;
ИКР – импульсный коронный разряд;
 D – диаметр;
 r_0 – радиус закругления иглы;
ТГИ – тиристорный генератор импульсов;
ТП – технологический процесс;
ИКР – импульсный коронный разряд;
 $C_{об}$ – обострительная ёмкость;
ЛАТР – лабораторный автотрансформатор;
САР – система автоматического регулирования;
БАРЧ – блок автоматического регулирования частоты;
АРЧ – автоматическая регулировка частоты;
ГУН – генератор управляемый напряжением;
МДМ – модулятор демодулятор;
БМ – балансный модулятор;
 f – частота;
 M – модулятор;
 $У1$ – усилитель переменного напряжения;
ДМ – демодулятор;
ФНЧ – фильтр низких частот;
УГ – управляющий генератор;
 $У2$ – усилитель постоянного напряжения;
ОУ – операционный усилитель;
ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;
АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
В диссертации использованы традиционные для электротехнической литературы единицы: г, см, с. Энергия частиц измеряется в эВ, а для измерения электрических величин служат В, А, кОм, Вт, Гц, давления – мм рт.ст., температуры – К, °С.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы.

Озон, являясь газом с уникальными бактерицидными свойствами и обладая высоким окислительным потенциалом, нашел разнообразное и обширное применение в различных областях жизнедеятельности человека и в различных отраслях производства, среди которых особое место занимают сельское хозяйство и пищевая промышленность.

Одним из способов повышения эффективности ряда технологических процессов в пищевой промышленности является использование озонозоооздушной смеси. Это обусловлено участием озона во многих биохимических процессах, являющихся основой обмена веществ и энергий в сельскохозяйственных биологических объектах. Итогом такого применения озонозоооздушной смеси является повышение производительности, снижение энергоемкости, снижение бактериологического и вирусного угнетения, повышение урожайности, продуктивности и сохранности сельскохозяйственной продукции. Одним из новых направлений хранения плодов, овощей, зерна и технических культур является применение озона. Озонированный воздух с успехом применяется как средство для стерилизации, обеспечения сохранности пищевых продуктов и для устранения запаха (дезодорация) в холодильниках и овощехранилищах. Озон разрушает поверхностную плесень, очаги гниения и убивает бактерии на поверхности мяса, рыбы, овощей, фруктов, яиц, сыров, что приводит к удлинению срока сохранности и свежести. Озон разрушает поверхностную плесень, очаги гниения и убивает бактерии на поверхности мяса, рыбы, овощей, фруктов, яиц, сыров, что приводит к удлинению срока сохранности и свежести. Окисляя этилен, озон задерживает перезревание фруктов, уничтожает окись углерода и резко снижает содержание вредных, токсичных, дурно пахнущих веществ в воздухе.

В связи с разнообразными областями использования озона особую актуальность приобретают задачи разработки научно-обоснованной технологии применения электроозонирования при хранении сельскохозяйственной продукции.

Разработка высокоэффективных озонных технологий и озонирующих устройств имеет большое значение и требует исследования теоретических положений и анализа экспериментальных данных, совокупность которых позволила бы развить научно-обоснованный методический аппарат проектирования данных систем с учетом требований, предъявляемых пищевой промышленностью.

При применении озона в пищевой промышленности большое внимание должно быть обращено на концентрацию выделяемого озона для обработки продукции. Также необходимо учитывать особенности технологического процесса, видовой состав микрофлоры, температуру, влажность и другие параметры, которые могут оказать влияние на действие озона. Таким образом, данный процесс требует осуществления мониторинга и управления в режиме реального времени.

В связи с этим разработана математических моделей и алгоритмов управления, учитывающих особенности процесса озонирования и ориентированных на современные средства вычислительной техники, с целью создания АСУ ТП, определяет актуальность избранной темы диссертации.

Цель работы. Исследовать и разработать автоматизированную установку с мониторингом и оперативным управлением озонированием воздуха для повышения сроков хранения сельскохозяйственной продукции в закрытых помещениях на основе усовершенствованной конструкции озонатора.

Задачи исследования. В соответствии с поставленной целью определены следующие научные задачи, которые необходимо решить в настоящей работе:

1. выполнить анализ и выявить научные, технологические и технические проблемы автоматизации и управления процессами озонирования воздуха при хранении сельскохозяйственной продукции в закрытом объеме;

2. разработать усовершенствованную конструкцию озонатора с автоматической регулируемой частотой на основе методов и способов усиления тока в озонаторах на коронном разряде, обеспечивающих повышение выхода озона (в т.ч. разработать методику расчета перепада давления в озонаторе, работающего по принципу ионно-конвекционного насоса);

3. разработать адаптивные прогнозирующие модели технологического процесса озонирования при хранении сельскохозяйственной продукции, а также условия идентифицируемости объекта управления для синтеза алгоритма идентификации;

4. предложить и исследовать функциональные схемы системы управления автоматизированной установки с мониторингом и оперативным управлением процессами озонирования воздуха при хранении сельскохозяйственной продукции в закрытом объеме с использованием разработанной математической модели;

5. разработать и провести опытные испытания системы управления автоматизированной установки с мониторингом и оперативным управлением процессами озонирования воздуха при хранении сельскохозяйственной продукции в закрытом объеме.

Объект исследования. Режимы озонирования воздуха для обеспечения процессов сохранности сельскохозяйственной продукции в системе «озонатор-овощехранилище», являющейся основой автоматизированной установки.

Методы исследований. Для решения поставленных задач в работе используются методы измерения электрических и неэлектрических величин, математического и физического моделирования, теории автоматического управления, а также методы системного анализа, планирования и обработки результатов экспериментов.

Научную новизну работы составляют:

– Разработанная математическая модель ионизационных процессов в коронном разряде и расчетные значения зависимости плотности озона в зоне коронного разряда от величины разрядного тока и конфигурации коронирующего электрода.

– Обоснование представления технологического процесса озонирования при хранении сельскохозяйственной продукции в качестве нестационарного динамического многомерного многосвязного объекта, для которого впервые предложено аналитическое описание в виде системы из q разностных уравнений, линейных относительно коэффициентов.

– Впервые предложенная методика получения адаптивных прогнозирующих моделей технологического процесса озонирования при хранении сельскохозяйственной продукции для синтеза алгоритма идентификации и адаптивной системы управления ТП озонирования.

– Синтез системы управления автоматизированной установки с мониторингом и оперативным управлением процессами озонирования воздуха при хранении сельскохозяйственной продукции в закрытом объеме с использованием разработанной динамической математической модели.

На защиту выносятся следующие научные положения:

– математическая модель ионизационных процессов в коронном разряде и расчетные значения зависимости плотности озона в зоне коронного разряда от величины разрядного тока и конфигурации коронирующего электрода;

– озонатор на коронно-барьерном разряде, работающий при высоковольтном импульсном питании с автоматической регулируемой частотой;

– математическая модель технологического процесса озонирования при хранении сельскохозяйственной продукции в виде системы из q разностных уравнений, линейных относительно коэффициентов;

– методика получения адаптивных прогнозирующих моделей технологического процесса озонирования при хранении сельскохозяйственной продукции для синтеза алгоритма идентификации и адаптивной системы управления ТП озонирования;

– алгоритмы управления, обеспечивающие оптимальный режим обработки озонем сельскохозяйственной продукции.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. В результате проведенных исследований найдены условия усиления тока, позволяющие получить озон из неосушенного воздуха с энергетическим выходом 40 – 50 граммов на кВт·час, что позволяет упростить конструкцию озонатора и получить малые удельные энергозатраты на 1г. озона.

2. Разработан, изложен и испытан озонатор высоковольтных импульсов ОВИ-1 работающий в коронно-барьерном разряде с более высоким достоинством.

3. Разработана система автоматического регулирования концентрации озона в рабочем помещении.

Конкретное личное участие автора в получении научных результатов заключается в следующем:

– постановке задач исследований и способов их реализации;

- разработке и изготовлении опытного образца озонатора высоковольтных импульсов для дезинфекции и санаций воздуха, работающего при пониженном давлении атмосферного воздуха;
- проведении экспериментальных исследований и опытных испытаний озонатора ОВИ-1;
- обосновании представления технологического процесса озонирования при хранении сельскохозяйственной продукции в качестве нестационарного динамического многомерного многосвязного объекта, описываемой системой из q разностных уравнений;
- разработке методики получения адаптивных прогнозирующих моделей технологического процесса озонирования при хранении сельскохозяйственной продукции;
- разработке технологической схемы озонирования и системы управления автоматизированной установки озонирования воздуха при хранении сельскохозяйственной продукции в закрытом объеме.

Реализация результатов исследования:

Разработанная автоматизированная установка озонирования воздуха прошла научно – экспериментальные, производственные испытания в:

- Люблинском политехническом университете, с целью определения производительности и удельного энергетического выхода озона, в период с 07.06.2016 – 08.07.2016г.

- Овощехранилище продовольственного рынка «Арзан», г.Кызылорда. Производственные испытания. Сроки проведения 11.2016г. – 02.2017г.

Научные результаты диссертационной работы внедрены в процесс хранения и подготовки продукции компании «Herbapol» г. Люблин (Польша).

Апробация работы: Основные положения диссертации докладывались и обсуждались в Международных конференциях:

1. Исследование процесса коронного разряда как объекта управления. Кошимбаев Ш. К., Тойгожинова А.Ж. Труды международных сатпаевских чтений «Роль и место молодых ученых в реализации новой экономической политики Казахстана», Том IV, направление инновации по информационным, телекоммуникационным и космическим технологиям,– Алматы, 2015, стр.235-239.

2. Mathematical modeling of processes in the zone of corona discharge ionization A. Toigozhinova, G. Yussupova. Lubelskie Dni Nauki i Biznesu. Pod patronatem honorowym Polskiego stowarzyszenia tomografii procesowej I Komitetu elektrotechniki polskiej akademii nauk. Warsztaty doktoranckie. WD2016. Science conference. Lublin, 11 – 13 Czerwca 2016. ISBN 978-83-60617-45-8. p.219-220.

3. A modeling and diagnostics process combined popping of biogas and natural gas to reduction of greenhouse gases. O.V. Zhirnova, S.E. Zhumabek, E.A. Kulakova, A.Z. Toygozhinova. Международные Сатпаевские чтения «Конкурентоспособность технической науки и образования», посвященные 25-летию Независимости Республики Казахстан, 2016. Стр. 897-904, т.1.

4. Artificial intelligence methods in diagnostics of coal-biomass blends co-combustion in pulverised coal burners. Smolarz, W. Wojcik, K. Gromaszek, P. Komada, V. Lytvyenko, N. Mussabekov, L. Yesmakhanova, A. Toigozhinova. Proceedings of the fifth national congress of environmental engineering, Lublin, Poland, 29 may – 1 june, 2016. Environmental Engineering V – Pawlowska & Pawlowski (Eds), p. 311-317, 2017 Taylor & Francis Group, London, ISBN 9788-1-138-03163-0.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается применением современных теоретических и экспериментальных методов для исследования механизмов и кинетики образования и потери озона в коронном разряде. Обоснованность и достоверность полученных научных положений также подтверждаются результатами испытаний автоматизированной установки озонирования воздуха, показавшие высокую эффективность озонной обработки сельскохозяйственной продукции. Экспериментальные результаты по энергетическому выходу озона подтверждаются данными из решения системы дифференциальных уравнений, составленных для физико-химических процессов в чехле коронного разряда.

Публикации. По основным результатам выполненных исследований и разработок подготовлены и опубликованы более 25 научных работ, в том числе 1 книга, 3 предпатента и 3 инновационных патента, из них 5 работ опубликованы в изданиях рекомендованных комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК.

Структура и объем диссертации: Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов основного содержания, заключения и приложений, библиографического списка из 67 наименований и содержит 166 страниц, 50 рисунков и 17 таблиц.

В первом разделе описаны основные принципы взаимодействия озона с микроорганизмами и процессов бактерицидной обработки поверхностной микрофлоры и других патогенных бактерий и микробов, а также проведено сравнение по эффективности озонной обработки с другими методами электроантисептирования объектов обработки. Выявлено, что в настоящее время нет промышленных озонаторов, используемых для озонирования закрытых производственных помещений с возможностью автоматического регулирования концентрации озона. Из анализа существующих разработок автоматизированных систем и установок по применению озона показано, что разработка автоматизированного управления концентрацией озона в овощехранилище отличается наличием многих меняющихся факторов в виде разновидности и формы, степени зрелости и залежности продуктов обработки, что значительно усложняет процедуры оптимизации режимов озонирования воздуха в овощехранилище. Поэтому для оптимизации режимов озонирования необходимо разработать адаптивные прогнозирующие модели технологического процесса озонирования при хранении сельскохозяйственной продукции, а также условия идентифицируемости объекта управления для синтеза алгоритмов идентификации и адаптивного управления. В разделе

сформулированы цель и задачи данного диссертационного исследования, а также обоснованы направления исследований и общая методика проведения научно-исследовательской работы.

Во втором разделе дана качественная картина распределения ионов O^- , O_2^- , O_3^- , O_2^+ и электронов в коронирующем слое отрицательной короны. На основе вольтамперных характеристик получены расчетные значения плотностей ионов озона и кислорода на границе коронирующего слоя. На основе уравнения непрерывности для ионов озона получено выражение для плотности нейтральных молекул озона в разрядной зоне отрицательной короны. Решена система дифференциальных уравнений для коронного разряда с целью моделирования процессов в зоне разряда и определения доли диффузионной составляющей тока коронного разряда. Решена задача по разработке озонатора с применением свойств электрического ветра, возникающего в условиях коронного разряда, что позволило упростить конструкцию озонатора и получить малые удельные энергозатраты на единицу веса вырабатываемого озона. В разделе разработан озонирующий элемент на коронно-барьерном разряде при малых межэлектродных расстояниях, который обеспечит малогабаритность его и приводит к значительному снижению величины напряжения питания. Также разработана усовершенствованная конструкция озонатора, работающего в полужакрытом режиме и состоящего из отдельно расположенных озонирующих элементов и коронирующих электродов для создания электрического ветра.

В третьем разделе дано обоснование представления технологического процесса озонирования при хранении сельскохозяйственной продукции в качестве нестационарного динамического многомерного многосвязного объекта управления с входами p и выходами q , для которого предложено аналитическое описание в виде системы из q разностных уравнений, линейных относительно коэффициентов. Получена адаптивная прогнозирующая модель ТП озонирования, а также условия идентифицируемости объекта управления, с учетом которого синтезирован алгоритм идентификации. Составлен алгоритм синтеза адаптивной прогнозирующей модели управления ТП озонирования. Произведен синтез оптимального регулятора адаптивной систем управления ТП озонирования. Разработана система автоматического регулирования (САР) концентрации озона в рабочем помещении. Составлен алгоритм и программа управления МК для основного режима работы БАРЧ на основе результатов моделирования. На основе полученных данных, разработана автоматизированная установка озонирования для дезинфекции и санации атмосферного воздуха в производственных помещениях.

В четвертом разделе Проведены экспериментальные исследования автоматизированной установки озонирования воздуха. Экспериментальным путем определены производительности, и удельный энергетический выход озона. Выполнена оценка структуры и параметров адаптивной прогнозирующей модели ТП озонирования при использовании активной идентификации. Произведена оценка адекватности адаптивной прогнозирующей модели и

нестационарного динамического технологического процесса озонирования. По предложенной технологической схеме озонирования проведены опытные испытания в производственных условиях.

В заключении диссертации по результатам представленных и обсуждённых разработок и исследований сформулированы основные выводы работы.

В приложении приведены сведения об опытных испытаниях и использовании результатов работы для практических целей, также приведены данные и программы управления системы автоматического регулирования. Также приведены патенты и удостоверения автора по научным изобретениям.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОЗОНИРОВАНИЕМ ВОЗДУХА ПРИ ОБРАБОТКЕ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

1.1 Существующие методы и способы дезинфекции и санации озонирования воздуха для дезинфекции рабочей атмосферы в производственных помещениях

Озон как средство для обеззараживания от патогенной микрофлоры был предложен А.П. Доброславиным в 1874 г. [1].

Сейчас он широко применяется для дезинфекции питьевой воды. В рассматриваемом в настоящей работе прикладном аспекте интерес представляет бактерицидная обработка поверхностной микрофлоры и бактериальных аэрозолей.

По мнению исследователей, [2, 3, 4], озон обладает сугубо поверхностным действием и может быть использован для уничтожения инфицирующих их микроорганизмов. Установлено [5, 6], что при температуре 288 – 293 К и относительной влажности воздуха 80 – 95 % концентрация озона менее 1 мг/м³ не влияет на патогенную микрофлору. При концентрации более 1 мг/м³ рост плесени на поверхности ингибируется.

Общественное использование озона – для очистки воздуха сооружений большего объема и удаления запахов и вредных испарений. В воздухе озон уничтожает бактерии, вызывающие гниение продуктов, препятствует образованию плесени и слизистых отложений [7]. Для уничтожения гнилостных бактерий и спор при 277 К и относительной влажности воздуха 60 – 90% достаточно озона концентрацией 0,08 – 0,2 мг/м³. Эта же концентрация озона при 273 К ингибирует развитие плесневых грибов на упаковке для хранения фруктов.

Исследовано воздействие озона на чистые культуры фитопатогенных грибов *Fusarium solani*, *Phytophthora infestans*, *Rhizoctonia solani*, высеянных на твердые питательные среды, при следующих режимах: концентрация озона $C=12 - 15$ мг/м³, температура $t=291$ К, относительная влажность воздуха $\phi=80 - 90\%$, продолжительность озонирования $t=20$ мин., 3 ч, 24 ч; $C = 12 - 15$ мг/м³, $T=277$ К, $\phi = 85 - 90\%$, $t=20$ мин., 3 ч, 24 ч; $C = 30$ мг/м³, $T=291$ К, $\phi=80 - 90\%$, $t= 48$ ч [44].

Результаты показали, что концентрация озона 12 – 15 мг/м³ при температуре 291 К оказывает угнетающее воздействие на рост гриба *Fusarium solani* (рисунок 1.1, кривые 1 – 3, D – диаметр колоний). Озонирование в течение 3 ч уменьшает интенсивность роста гриба в 2 раза по сравнению с контролем, а при 24-часовой выдержке – в 5 раз. Зависимость скорости роста гриба от продолжительности озонирования при температуре 277 К представлена на том же рисунке (кривые 4 – 6). Озонирование в течение 3 ч при концентрации 12 – 15 мг/м³ уменьшает скорость роста гриба в 1,1 раза, а в течение 48 ч – в 4,4 раза.

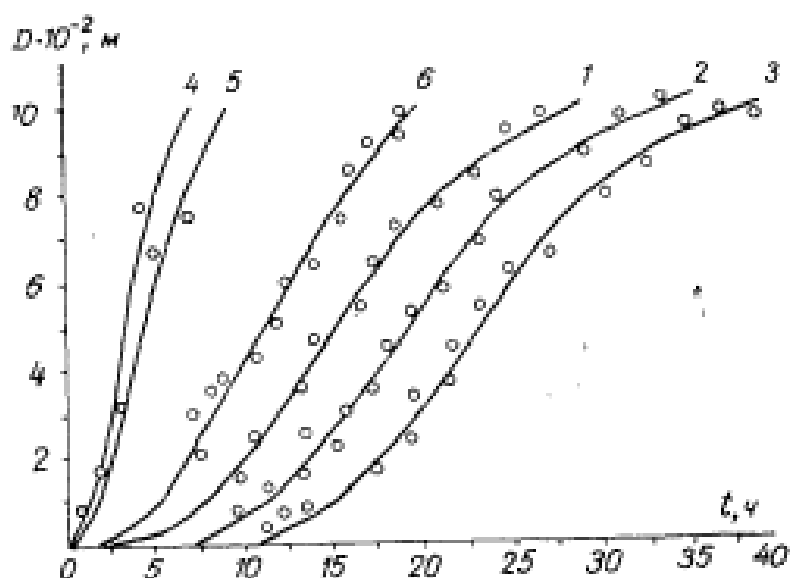


Рисунок 1.1 – Зависимость скорости роста гриба *Fusarium solani* от продолжительности озонирования

Автором сделан вывод, что воздействие озоном на культуру грибов *Fusarium solani* при изученных режимах не приводит к гибели, а оказывает бактериостатическое действие на их рост, лагфаза увеличивается в 1,5 – 3 раза. Зависимость скорости роста гриба *Rhizoctonia solani* от продолжительности озонирования при температуре 277 К показана на рисунке 1.2 (D – диаметр колоний). Обработка озонированным воздухом ($C=12-15\text{мг/м}^3$) в течение 24 ч уменьшает скорость роста гриба в 7 раз, лагфаза увеличивается в 4,5 раза. Установлено также, что рост гриба *Phytophthora infestans* подавляется полностью при озонировании в течение 20 минут [44].

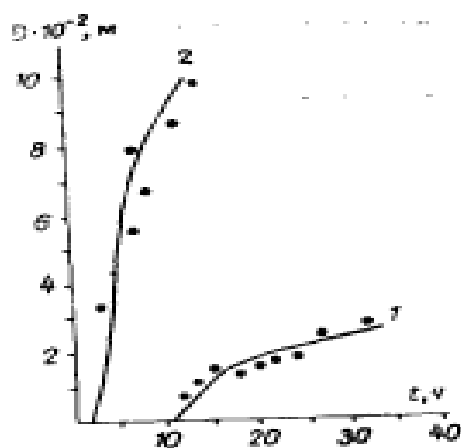


Рисунок 1.2 – Зависимость скорости роста гриба *Rhizoctonia solani* от продолжительности озонирования при температуре 277 К. Взято из [8].

По данным [7], концентрация озона 4 – 22 мг/м^3 обеспечивает уничтожение поверхностной микрофлоры. Согласно [9, 10], для подавления фитопатогенных микроорганизмов концентрация озона составляет 30 – 40 мг/м^3 , продолжительность обработки 2 – 9 ч. В то же время установлено, что

плесневые грибы наиболее чувствительны к озону в период лаг-фазы (концентрация озона 10 – 20 мг/м³).

Бактерицидный эффект при воздействии озоном на фитопатогенную микрофлору подтвержден исследованиями [11,12], хотя рекомендуемые режимы озонирования существенно различаются. Озонирование успешно используется для подавления патогенной микрофлоры в холодильных камерах [3, 13, 10], режимы обработки и в этом случае сильно различаются (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Режимы обеззараживания холодильных камер

Концентрация озона, мг/м ³	Периодичность, сутки	Экспозиция, час
20	–	–
30	–	–
12 – 14	–	10
1 – 12	5 – 7	3,5 – 4
35 – 40	Одноразовая	16 – 24

Исследования [14] показали, что озонирование холодильных камер при концентрации озона 12 – 14 мг/м³ и продолжительности обработки 10 часов обеспечивает 93%-й микоцидный эффект по отношению к плесневым грибам родов *Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium* и *Mucor*. Из зависимости микоцидного эффекта озонирования воздуха камер от времени при максимальной концентрации озона 14 мг/м³ следует (рис 1.3.), что при продолжительности озонирования 10 ч (рис. 1.3, а, штриховая линия) количество погибших микробных клеток N_n при температуре в камере 273,8 К (1) и 268 К (2) составляет соответственно 92,8 и 94,5%.

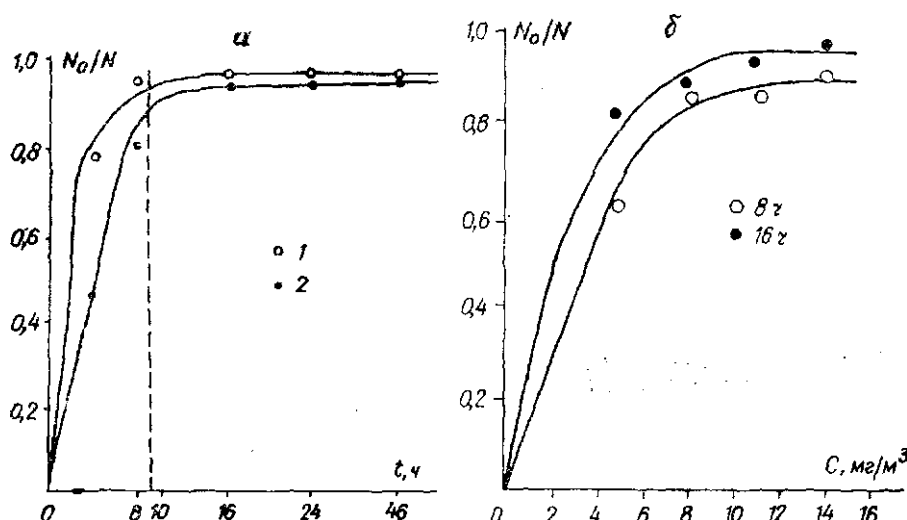


Рисунок 1.3 – Зависимость отмирания плесневых грибов в холодильных камерах от продолжительности озонирования (а) и концентрации озона в воздухе (б). Взято из [14].

Отмечают, что на холодильниках Росмясомолторга более 50% холодильных емкостей, свободных от грузов, обрабатываются методом озонирования. Для надежной дезинфекции и дезодорации холодильных камер предусмотрена концентрация озона 40 мг/м^3 в течение 16 – 24 ч [10].

За рубежом озон широко используется для стерилизации бутылок и других емкостей перед их наполнением. Для стерилизации стеклянных бутылок рекомендуют [7, 16, 39] обработку сжатым воздухом при концентрации озона около 30 г/м^3 в течение 15–20 с. Причем по сравнению с методом дезинфекции с помощью сернистого ангидрида, используемого в классическом процессе, дозировка озона составляет лишь одну сотую от дозировки сернистого ангидрида.

В то же время обнаружено, что действие озона носит биофазный характер [18, 19, 20]: кратковременная обработка озоном приводит к увеличению числа проросших спор, а более длительная – ингибирует их прорастание. В частности, 5-минутная обработка озоном в концентрации 250 мг/м^3 приводит к гибели 50% микробных клеток и замедляет процессы перехода бактерий в логарифмическую фазу роста. Снижение концентрации озона до 50 мг/м^3 и экспозиции до 5 секунд вызывает стимуляцию роста бактерий. Как уже отмечалось [3], 20-минутная экспозиция озона при его концентрации 12 – 15 мг/м^3 оказывает стимулирующее действие на культуры фитопатогенных грибов.

Что касается механизма действия озона на микробную клетку, то единого мнения по этому вопросу до сих пор не выработано.

Природу действия озона на микробную клетку объясняют [19, 20] изменением под влиянием озона проницаемости мембраны клеток или даже полным ее разрывом. Высказывается [21] также мнение, что действующим началом озонирования является атомарный кислород, образующийся при распаде озона.

Ряд авторов [3, 4] указывает на быструю диссоциацию озона в закрытом объеме с высокой влажностью воздуха, в связи, с чем для поддержания заданного уровня озона необходимо часто определять его концентрацию. В то же время использованный большинством исследователей йодометрический метод измерения концентрации озона не может обеспечить экспресс-анализа озона в воздухе, что, по-видимому, является одной из основных причин имеющихся противоречий в рекомендуемых различными авторами режимах озонирования. Таким образом, для выработки однозначных рекомендаций по дезинфекции озоном в различных отраслях пищевой промышленности и воспроизводимости рекомендуемых режимов бактерицидной обработки насущной является разработка обоснованных в специфических условиях пищевых производств методов и средств экспресс-контроля озоновоздушной среды.

Во многих публикациях [12, 22, 23] отмечается, что в области электрической обработки биологических объектов наибольший практический

интерес представляет сочетание действия электрического поля, ионизированного воздуха и озона. Однако данные измерений содержания озона и (или) концентрации ионов в воздухе в указанных работах не представлены.

Положительное влияние совместного применения компонентов электронно-ионной обработки при подавлении вредной поверхностной микрофлоры томатов отмечено в работе [24].

Положительные результаты получены [25] по бактерицидной обработке озонной воздушной средой поверхностной микрофлоры апельсинов (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Электроантисептирование поверхностной микрофлоры

Режим	Концентрация			Общая микробиолог-я обсемененность на 1 мл смывов		Количество плесеней на 1 мл смывов	
	отрицательных аэроионов, м ⁻³	положительных аэроионов, м ⁻³	озон, мг/м ³	30-й день	40-й день	30-й день	40-й день
I	$7,5 \cdot 10^{11}$	–	1,79	30	25	6	1
II	$3,1 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{12}$	0,09	30	25	4	3
III	–	$2 \cdot 10^{12}$	0,11	4	3	9	3
IV	$4 \cdot 10^{12}$	–	3,07	2	0	0	0
Контроль	–	–	–	338	290	48	45
Исходное сырье	–	–	–	511		36	

Как представлено выше, даже выборочное описание некоторых примеров применения озона показывает насколько широк круг заинтересованных в этом объектов. Озонная технология в нашей республике находится в начальном состоянии, в то время как в развитых странах эта технология получила широкое распространение и используется в различных отраслях промышленности, в сельском хозяйстве и здравоохранении [38].

Вопросы хранения пищевых продуктов решаются в сельскохозяйственном производстве, пищевой промышленности, на предприятиях торговли, общественного питания, продовольственного снабжения населения.

Изменение качества пищевых продуктов в процессе длительного хранения обусловлено с происходящими в них биологическими процессами, главным образом, ферментативными, а также деятельностью микроорганизмов, разлагающих и минерализующих органические вещества, иногда с образованием токсических продуктов распада.

Анализируя состояние современных методов хранения пищевых продуктов, следует отметить, что они являются эффективными и перспективными. В то же время необходимо указать на большие потери, особенно плодоовощной продукции из-за несовершенства современных методов хранения. Например, в овощехранилищах погибает до 30% картофеля,

а при хранении сахарной свеклы в кагатах она безвозвратно теряет от 3 до 8% сахара, что приводит к непроизводительным затратам материальных и трудовых ресурсов.

Таким образом, электростимуляция биологических процессов открывает широкие возможности в интенсификации медленно протекающих процессов, таких как, например, ячменя в производстве солода, в результате чего появляется реальная возможность не только ускорить этот процесс в 2 раза, но и увеличить выход экстрактивных веществ на 30% с одновременным улучшением качества пива. Можно указать еще на ряд принципиально новых направлений применения электростимуляции с помощью коронного разряда для ускорения других ферментативных процессов, хранения и переработки пищевых продуктов и организации безотходного производства их [36].

Между тем, экспериментальные данные о действии озона и электрического поля на биологические объекты пока еще не позволяют делать какие-либо заключения. Можно только отметить лишь в общих чертах их влияние на культуры клеток, где может быть стимулирующий, либо угнетающий эффект в зависимости от вида культуры, условий и параметров внешних воздействий [37].

1.2 Современное состояние исследований по автоматизации процесса озонирования воздуха

Связь качества озонирования с физически реализуемыми управлениями (изменением материальных потоков и затрачиваемой на синтез озона электроэнергии) описывается в динамике настолько сложными уравнениями и размерность вектора управлений так велика, что оперативная оптимизация «технологической» части себестоимости озонирования в настоящее время практически неосуществима. Тем не менее, можно указать способ управления процессом озонирования, который не требует преодоления описанных выше трудностей и позволит получить результат близкий к оптимальному. Для этого нужно учесть следующие важные обстоятельства.

1. Самым энергоемким подпроцессом технологических схем озонированной очистки является участок получения озона, точнее, приготовления озоноздушной смеси. Рациональное управление этой частью установки позволяет стабилизировать состав получаемого в генераторах (котлах-озонаторах) озонированного воздуха для окисления вредных компонентов в помещениях для хранения сельхозпродукции. Таким образом, основными источниками возмущений технологического режима дезинфекции и санации являются изменения производительности системы и характеристик используемого оборудования.

2. Указанные возмущения имеют весьма низкую частоту, а резкие колебания происходят лишь в периоды аварийных или плановых переключений отдельных аппаратов в связи с началом или окончанием ремонтных работ.

3. Изменения производительности, как отдельных аппаратов, так и всей технологической системы в целом вызывают изменение функционала -

технологической составляющей себестоимости, но при этом оптимальные значения величин, характеризующих составы внутренних промежуточных потоков остаются постоянными. Исключение составляют значительные скачки нагрузки, когда изменяются допустимые пределы технологических ограничений.

Таким образом, большую часть времени система управления процессом озонирования должна стабилизировать состав внутренних потоков атмосферного и озонированного воздуха на выходе отдельных аппаратов на оптимальном уровне в рамках ограничений, обусловленных требуемым количеством озона и озонирования. В тех случаях, когда изменяющаяся во времени производительность отдельных аппаратов подготовки воздуха и получения озона исключает возможность удовлетворить эти ограничения при заданной производительности всей установки, необходимо оптимальное изменение заданий на стабилизацию режимов охлаждения и осушки воздуха и синтеза озона.

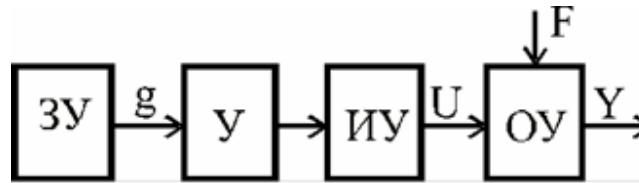
Такая стратегия управления позволит значительную часть времени управлять отдельными аппаратами технологической схемы автономно, т.е. независимо друг от друга. Поскольку целью такого автономного управления является стабилизация качества внутренних потоков на выходе аппаратов, алгоритмы и системы управления в этом режиме можно синтезировать известными методами теории автоматического управления, используя упрощенные математические модели управляемых процессов [39].

В те периоды, когда по указанным выше причинам необходимо изменять стабилизирующий режим, для формирования управляющих воздействий следует учитывать технологическое состояние всей установки озонированной очистки в целом. Система управления при этом должна заниматься задачей оперативной оптимизации комплекса взаимосвязанных аппаратов схемы, в результате решения которой будет выработано новое задание на стабилизацию режимов работы отдельных аппаратов.

Для реализации функций такой АСУ ТП необходимы не только информационное, программное и техническое обеспечение, но и оперативный персонал, который может работать как в контуре управления, так и вне его [27]. При работе в контуре управления оперативный персонал реализует все функции управления или часть их, используя рекомендации по рациональному управлению установкой озонирования, выработанные комплексом традиционных технических средств или УВК. Такой режим функционирования называют информационно-советующим.

Из теории регулирования известно, что разомкнутые системы управления с коррекцией по возмущению отличается большой устойчивостью и быстродействием, так как в замкнутой системе управления управляющая реакция вырабатывается по отклонению выходной величины от воздействия возмущения.

В разомкнутой системе (рис. 1.4) температура наружного воздуха является возмущающим параметром.



ЗУ – задающее устройство; У – усилитель; ИУ – исполнительное устройство; ОУ – объект управления; g – задающее воздействие; U – управляющее воздействие; Y – выходная величина; F – возмущающее воздействие.

Рисунок 1.4 – Функциональная схема разомкнутой САУ

Вводим в разомкнутую систему управления связь по возмущению. В этой структуре возмущающее действие f на объекте измеряется и подается на управляющее устройство для выработки управляющего сигнала по заданному значению, который изменит значение входного сигнала (рис. 1.5).

При этом управляемая величина y не измеряется, и поэтому разомкнутая динамическая система, не обладающая ООС, собственно это автоматическая система управления (АСУ).

Для работы УУ необходимо наличие математического описания (математических моделей) объекта управления и других элементов системы, а также алгоритм управления, по которым и рассчитывают характеристики системы, обеспечивающие оптимальное управление.

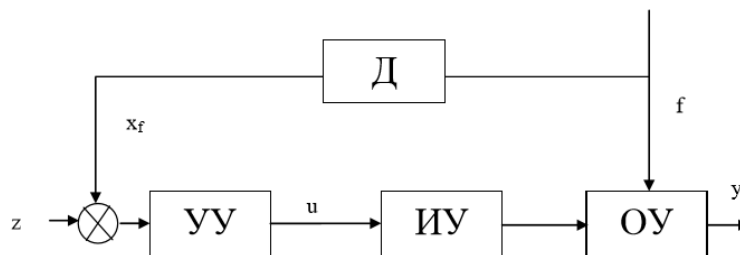


Рисунок 1.5 – Структура системы автоматического управления с компенсацией по возмущению

Оптимальное управление процессом озонирования воздуха для дезинфекции рабочей атмосферы в производственных помещениях сводится к выбору и реализации оптимальных в смысле принятого критерия технологических режимов.

Такая задача выбора оптимальных режимов может быть решена путем проведения последовательных экспериментов на объекте управления либо на основе его математической модели.

Как было показано, класс объектов управления, к которому относится процесс озонирования, характеризуется многомерностью, случайным характером переменных. Эти особенности затрудняют сбор оперативной и достоверной информации об объекте, усложняют поток оптимальных режимов и не позволяют оператору-технологу использовать экспериментальные методы оптимального управления.

В этих условиях метод оптимального управления должен опираться на математическое описание объекта, позволяющее формализовать задачи прогнозирования и косвенной оценки не измеряемых переменных, выбора управлений в условиях неопределенности и ограничений на переменные состояния и управления.

В связи со случайными изменениями характеристик хранимой продукции и озонатора, оказывающих основное влияние на процесс озонирования, представляется целесообразным для его описания и определения управляющих воздействий использовать методы, содержащие в своей основе статистический подход к решению задачи оптимального управления [76].

Не стационарность объекта и значительное число воздействующих на него случайных факторов приводят к чрезмерной громоздкости данного метода и затрудняет его применение к задаче оптимального управления процессом озонирования при хранении сельскохозяйственной продукции.

Алгоритмы функционирования систем адаптивного оптимального управления включают в себя алгоритмы проверки адекватности математических моделей, адаптации моделей, поиска на модели оптимального технологического режима и выдачи оптимальных управлений на объект. К числу основных достоинств данного метода следует отнести:

- возможность применения метода в условиях недостаточной априорной информации об объекте управления;
- возможность учета влияния низкочастотных неконтролируемых факторов путем текущей коррекции параметров модели;
- возможность описания объекта с нелинейной характеристикой адаптируемой линейной моделью;
- сокращение объема вычислений и занимаемой памяти, связанных с построением математической модели.

Особенности характеристик системы «хранилище-озонатор», анализ функционирования существующих систем автоматики с использованием частотно-регулируемых преобразователей позволяют сформулировать основные требования к процессу управления хранением сельхозпродукции, как обеспечение максимальной КПД и экономии электроэнергии на производство озона. Эти условия могут быть обеспечены:

- работой озонатора в оптимальных рабочих условиях;
- исключением аварийных режимов (продукция может быстро испортиться).

Особенности ведения процесса озонирования определяют выбор следующих принципов управления:

- принципа оптимальности. Нахождение оптимального режима управления озонатора требует решения математической задачи методом математического программирования в зависимости от вида математической модели системы;
- принципа компенсации. Поскольку озонатор работает в условиях, на которые существенное влияние оказывают наблюдаемые (но неуправляемые)

возмущения (состояние хранимой продукции), это обуславливает необходимость применения управления по возмущению.

Прежде чем расписать общий алгоритм управления необходимо разработать структурную схему управления автоматизированной установкой озонирования воздуха (рис. 1.6).

Структурная схема управления автоматизированной установкой озонирования воздуха (рис. 1.6) представляет собой вид системы с компенсацией по возмущению. Входными параметрами являются значения: V – объем овощехранилища; C – текущая концентрация озона в воздушной среде овощехранилища ($C_2 - C_6$ – показания озонометров в установке); C_1 – концентрация озона на выходе озонатора; C_n – начальная концентрация озона в воздухе овощехранилища; выходной параметр f – значение состояния хранимой продукции.



Рисунок 1.6 – Управление автоматизированной установки озонирования воздуха

С учетом выбранного принципа, система управления озонированием относится к классу оптимальных систем по возмущению. Эффективным методом исследования таких систем, который характеризуется высокой динамичностью процессов и воздействиями случайных факторов, и неопределенностью, может служить метод имитационного моделирования. При этом экспериментально-аналитическая модель, полученная на основе анализа физических свойств процесса, играет роль объекта при имитационном моделировании.

Независимо от используемого режима управления эффективность работы АСУ ТП определяется также принятой ее технической структурой. Первым и до сих пор наиболее распространенным в технологии дезинфекции и санации типом является централизованная структура. В системах с такой структурой вся информация, необходимая для управления процессом очистки, поступает в единый центр – операторский пункт, где установлены практически все средства АСУ ТП (за исключением источников информации и исполнительных устройств) и где находится оперативный персонал. Такая техническая структура наиболее проста и имеет ряд очевидных эксплуатационных достоинств. Недостатком же ее является необходимость избыточного числа

элементов для обеспечения надежности функционирования и большие затраты на приобретение дорогостоящего кабеля. Поэтому, на наш взгляд, она может быть целесообразной для сравнительно небольших по мощности и компактных установок озонированной очистки с умеренными требованиями к их надежности.

В связи с внедрением микропроцессорной техники в последние годы все большее распространение получает распределенная техническая структура АСУ ТП, т.е. структура, расчлененная на ряд автономных подсистем - локальных технологических станций, территориально распределенных по технологическим участкам объекта управления. Каждая такая локальная подсистема представляет собой однотипно выполненную централизованную структуру, ядром которой является управляющая микроконтроллеров. Локальные подсистемы через свои микроконтроллеры объединены в единую систему сетью передачи данных с высокой пропускной способностью.

Системы автоматического мониторинга и регулирования (САР) концентрации озона в овощехранилище. САР производит непрерывный контроль концентрации озона в рабочем объеме и должна обеспечивать стабилизацию концентрации озона на требуемом уровне и необходимую цикличность работы при дезинфекции и санации сельскохозяйственной продукции.

Объектом мониторинга и регулирования является концентрация озона в атмосферном воздухе, находящегося в овощехранилище. Регулирующим органом служит озонатор с компрессором, который формирует входное воздействие на объект. Элемент, которым формирует сигнал управления на регулирующий орган, называется программным регулятором (микропроцессор). Именно с помощью него происходит настройка системы озонирования, вводятся необходимые параметры обработки, и обеспечивается цикличность работы. Основные параметры объекта САР: объем V (м³), влажность B (%), давление p (атм.). Следует считать их выбранными и установленными в соответствии с требованиями хранения овощей и фруктов.

Микропроцессор управляет режимом озонирования, изменяя концентрацию озона в атмосферном воздухе. Установка требуемой концентрации озона в атмосферном воздухе определяется видом и типом продуктов обработки и их залежностью, а также инерционностью и наполняемостью ими объема овощехранилища (коэффициент наполнения $K_n = v_{\text{оф}}/V_x$) [87].

При разработке САР следует учесть, что озон действует как окислитель по принципу «все или ничего», поэтому концентрацию озона в рабочем объеме необходимо выбрать по требованию вида и формы продуктов обработки. Известно, что естественная диссоциация молекул озона проходит примерно в 3 и более раза медленнее времени эффективной работы озона, в качестве антисептика. Практикой установлено, что оптимальный рабочий диапазон озона лежит в пределах 5 – 50 мг/м³, например, при 40 мг/м³ озона время обработки составляет 7,5 – 10 минут.

Расход озона в рабочем объеме происходит двумя путями: во-первых, естественная диссоциация озона в объеме, как мы отметили более медленный процесс, во-вторых, озон наиболее эффективно расходуется при обработке овощей и фруктов. Восполнение убыли озона производится регулированием количества озона, поступающего в виде озоноздушного смеси от озонатора.

Ограничение производительности или мощности САР. Компоненты САР и, тем самым, всей системы озонирования рассчитаны и подобраны на основании рекомендуемых норм с определенным запасом. В динамических условиях работы системы озонирования возникают пиковые нагрузки, которые значительно превышают номинальные. Пиковые нагрузки в лучшем случае снижают экономию и срок эксплуатации компонентов, в худшем – могут вызвать сбой системы. Контроллер САР помогает избежать пиковых нагрузок при помощи функции ограничения мощности. Эта функция может работать при наличии узла учета, из которого получает соответствующую информацию. При обнаружении предельной максимальной нагрузки контроллер уменьшает подачу озона в соответствии с установленным ограничением.

Исполнительные компоненты автоматики. Система автоматизации состоит из нескольких компонентов, и на конечный результат влияет правильный подбор всех компонентов, так как контроллер не может компенсировать недостатки других элементов системы.

Датчики. Качество используемых датчиков по непонятным причинам часто недооценивается. Датчики должны быть не только надежными, но, что важно для систем озонирования, малоинерционными. Рекомендуется использовать датчики с постоянного времени менее 4 с. Так при замене датчика с константой 8 с на датчик с константой 4 с. срок службы озонатора увеличивается на 40%.

В системах озонирования рекомендуется использовать также датчик состояния хранимой продукции (химического состава), который предварительно информирует контроллер об изменении состава компонентов и, тем самым, влияет на качество управления.

Контроллер. Контроллер системы озонирования должен работать по ПИД-алгоритму и быть оснащенным функциями адаптации и оптимизации, которые описаны ниже.

Адаптация концентрации озона. Озонатор работает в жестких условиях. Он должен быстро реагировать на изменения состояния хранимой продукции в хранилище. Для этого предусмотрен собственный регулятор на работоспособность, динамическую точность автоматической системы с ПИД алгоритмом и срок эксплуатации озонатора существенное влияние оказывают параметры настройки (константы алгоритма). При этом работа контроллера усложняется различной сменой режимов в зависимости от периодичности замены хранимой продукции.

Контроллер должен быть оснащен функцией адаптации управления озонатором. Контроллер постоянно оценивает концентрацию озона (<100%) и

определяет диапазон ее управления. Таким образом, достигается стабильная работа контроллера в течение всего года.

С учетом этого к устройствам автоматики предъявляются следующие требования:

- быстроедействие поддержки требуемой концентрации озона;
- рекомендуется озонатор с автоматизированной настройкой режимов;
- возможность использования информации состоянии хранимой продукции и комбинированной структуры автоматической системы регулирования с компенсацией возмущения;
- возможность быстрой перенастройки режимов хранения в зависимости от вида и типов хранимой сельскохозяйственной продукции.

1.3 Современное состояние исследования и разработок автоматизированных систем и установок для промышленного применения озона

Озон, являясь газом с уникальными бактерицидными свойствами и обладая высоким окислительным потенциалом, нашел разнообразное и обширное применение в различных областях жизнедеятельности человека и в различных отраслях промышленности.

Были разработаны системы озонированной очистки сточных вод и отходящих газов [38]. В этой работе разработаны динамические математические модели процессов озонированной очистки сточных вод и отходящих газов от сернистых соединений, представляющие системы обыкновенных дифференциальных уравнений мгновенных материальных балансов, учитывающих диффузионную и химическую кинетику окисления вредных компонентов; сформулирован критерий оптимальности, исследованы статические характеристики, определена конфигурация допустимой рабочей области процесса и решена задача его статической оптимизации; Также показана практическая значимость результатов исследований рассматриваемого класса технологических систем водо- и газоочистки, которые являются теоретической базой для научно-обоснованного выбора режимов и способов автоматического управления, структуры и технических средств автоматизации как на стадии проектирования новых, так и модернизации действующих систем.

В другой работе [39] приводится математическое и алгоритмическое обеспечение задачи автоматизации процесса дезинфекции ПЭТ – бутылок с помощью озона (на примере разлива пива). Обоснованием постановки задачи является то, что решение данной проблемы позволит значительно повысить и стабилизировать качества производимых напитков, избежать длительных, в течение 48 часов, лабораторных анализов. Кроме того, своевременная корректировка процесса дезинфекции ПЭТ-бутылок с учетом оперативно получаемой информации об основных показателях состояния процесса позволит достичь оптимального соотношения между себестоимостью и

качеством готовой продукции, решить чрезвычайно важную задачу экономии энергоресурсов.

В работе разработана принципиальная схема ведения процесса дезинфекции, а также не применявшийся ранее способ решения проблемы обеспечения микробиологической чистоты ПЭТ-бутылок в процессе разлива с помощью озонозвоздушной смеси, отвечающий возможностям автоматизации и соответствующий современному уровню техники и технологии; создана математическая модель контроля состояния процесса дезинфекции ПЭТ-бутылок по обобщенным показателям. Проведено исследование адекватности полученной математической модели; разработаны оригинальные алгоритмы и предложены новые технические решения для реализации метода и автоматизированной системы контроля состояния процессов дезинфекции ПЭТ-бутылок. На основе экспериментальных и теоретических выкладок была создана автоматизированная система контроля состояния процессов дезинфекции ПЭТ-бутылок. Данная разработка позволит отказаться от длительных по времени (48 часов) микробиологических анализов, необходимых для контроля качества процессов дезинфекции.

Наиболее близким по тематике исследования является работа [40], которая посвящена исследованию и разработке коронно-разрядного озонатора для непрерывной дезинфекции яиц в инкубаторе. Объектом исследования являлась система «коронно-разрядный озонатор – инкубационный шкаф» для непрерывной дезинфекции яиц в процессе инкубации. Были поставлены задачи исследования: исследовать основные конструктивные и технологические параметров коронно-разрядного озонатора; исследовать процесс образования озонозвоздушной смеси в инкубационном шкафу, оснащенной системой озонирования приточного воздуха; исследовать процесс очистки воздуха от аэрозольных частиц в инкубационном шкафу, оснащенной системой озонирования приточного воздуха.

В результате исследования и разработок: предложены критерий сравнительной оценки озонаторов, что позволяют обоснованно подойти к решению по выбору озонатора для обеспечения соответствующего технологического процесса; получена и экспериментально подтверждена аналитическая зависимость концентрации озона в воздушной среде инкубационной камеры оснащенной системой озонирования от времени дает возможность проводить инженерные расчеты при проектировании системы озонирования на основе использования коронно-разрядного озонатора-фильтра.

Технологическим основам ионноозонной обработки зерна пшеницы посвящена работа [41]. В работе отмечается важность и актуальность задачи в обработке зерна в плане создания новых компонентов не только окислительных, но и активизирующих окислительно-восстановительные процессы, стимулирующих биологические среды, способствующих повышению качества обрабатываемого продукта с сокращением производственных потерь и передачей по наследству приобретенных положительных качеств. Основной целью работы являлась разработка технологических основ ионноозонной

обработки запасов зерна пшеницы по уничтожению вредителей с повышением качества зерновых партий семенного и продовольственного назначения в системе «элеватор-мельзавод».

В процессе исследовательских работ получены новые научные и практические результаты, к которым относятся: установление параметров и теоретических основ ударной, многоступенчатой и многократной ионизации при синтезе ионноозонной смеси, в зависимости от внешних воздействий; математические аналитические уравнения процессов синтеза ионноозонной смеси, оксидов азота и углерода в зависимости от внешних воздействий; закономерность квантовофизических процессов в зерне пшеницы при ионноозонной обработке; технологическая схема реализации ионноозонной и гидроионноозонной обработки зерна пшеницы.

При разработке систем озонирования пчелиных семей для лечения болезней пчел важно выдержать параметры обработки. Основными параметрами являются концентрация озона в воздухе внутри улья и время обработки. Обеспечение требуемого времени обработки являются простой технической задачей. Большие сложности вызывает поддержание заданного значения концентрации озона в улье, т.к. на систему действует множество дестабилизирующих факторов. Снижение концентрации от заданного значения может привести к недостаточному воздействию на болезнетворные организмы и, как следствие, к развитию болезней пчел. Значительное превышение концентрации от заданного значения способствует губительному воздействию на пчел. В связи с этим была разработана система автоматического управления концентрацией озона в улье [42].

В работе представлены: математическая модель системы автоматического управления концентрацией озона в улье, устанавливающая связь производительности разрядного устройства и температуры окружающего воздуха и температуры диэлектрических барьеров; функционально-структурная схема и алгоритм работы САУ; результаты исследования качества стабилизации концентрации озона в улье. Даны рекомендации по применению результатов исследования.

Из анализа существующих разработок автоматизированных систем и установок по применению озона следует, что разработка системы автоматизированного управления концентрацией озона в овощехранилище является новым научным направлением и отличается наличием многих меняющихся факторов в виде разновидности и формы, степени зрелости и залежности продуктов обработки, что необходимо учитывать при оптимизации процесса озонирования воздуха в овощехранилище.

1.4 Обоснование направления исследований и общей методики проведения научно-исследовательской работы

Таким образом, можно сделать заключение, что озонные технологии являются перспективным направлением в развитии современной науки и дают

ощутимый экономический эффект при применении в пищевой промышленности для хранения сельскохозяйственной продукции.

На основе проведенного анализа не представляется возможным дать окончательный ответ об эффективных режимах электроантисептирования в пищевой промышленности. Для этого необходимы дальнейшие исследования, направленные, в первую очередь, на выяснение бактерицидного действия каждого из компонентов рассматриваемой технологии. С целью методически правильного решения поставленной задачи представляется целесообразным, прежде всего, рассмотреть разработать математические модели для обоснования режимов процесса озонирования воздуха в овощехранилище.

В работе следует рассмотреть также методы, предусматривающие использование в процессе идентификации и управления адаптивные системы, содержащие в контуре управления идентификатор. Такие системы получили название адаптивных систем с идентификатором (АСИ). Метод предполагает определение рационального технологического режима процесса путем решения задачи оптимизации, формализуемой в виде задачи математического программирования на основе математической модели процесса, параметры которой определяются и корректируются по мере дрейфа характеристик процесса с использованием алгоритм адаптации. При этом, по мере накопления информации об объекте и при условии сходимости алгоритмов коррекции параметров и решения оптимизационной задачи, технологический режим управляемого процесса стремится к оптимальному; таким образом, в отличие от дуального управления, управление с использованием адаптивных моделей квазиоптимально, но требует значительно меньшего объема вычислений. С учетом изложенного можно сформулировать цель данной работы и общую методику проведения научно-исследовательской работы.

Целью диссертационной работы является исследование и разработка автоматизированной установки с мониторингом и оперативным управлением озонированием воздуха для повышения сроков хранения сельскохозяйственной продукции в закрытых помещениях на основе усовершенствованной конструкции озонатора.

Из поставленной цели вытекают следующие задачи исследования:

1. выполнить анализ и выявить научные, технологические и технические проблемы автоматизации и управления процессами озонирования воздуха при хранении сельскохозяйственной продукции в закрытом объеме;

2. разработать усовершенствованную конструкцию озонатора с автоматической регулируемой частотой на основе методов и способов усиления тока в озонаторах на коронном разряде, обеспечивающих повышение выхода озона (в т.ч. разработать методику расчета перепада давления в озонаторе, работающего по принципу ионно-конвекционного насоса);

3. разработать адаптивные прогнозирующие модели технологического процесса озонирования при хранении сельскохозяйственной продукции, а также условия идентифицируемости объекта управления для синтеза алгоритма идентификации;

4. предложить и исследовать функциональные схемы системы управления автоматизированной установки с мониторингом и оперативным управлением процессами озонирования воздуха при хранении сельскохозяйственной продукции в закрытом объеме с использованием разработанной математической модели.

5. разработать и провести опытные испытания системы управления автоматизированной установки с мониторингом и оперативным управлением процессами озонирования воздуха при хранении сельскохозяйственной продукции в закрытом объеме.

1.5 Выводы по разделу

1. Выполнен анализ основных принципов взаимодействия озона с микроорганизмами и процессов бактерицидной обработки поверхностной микрофлоры и других патогенных бактерий и микробов, а также проведено сравнение по эффективности озонной обработки с другими методами электроантисептирования объектов обработки.

2. Выявлено новое направление применения озона для хранения плодов, овощей, зерна и других технических культур, что позволило использовать бактерицидные и дезодорирующие свойства озонированного воздуха для очистки хранилищ пищевых продуктов, овощехранилищ и других закрытых объемов с устойчивыми неприятными запахами.

3. Выявлено, что в настоящее время нет промышленных озонаторов, используемых для озонирования закрытых производственных помещений с возможностью автоматического регулирования концентрации озона.

4. Из анализа существующих разработок автоматизированных систем и установок по применению озона следует, что разработка автоматизированного управления концентрацией озона в овощехранилище отличается наличием многих меняющихся факторов в виде разновидности и формы, степени зрелости и залежности продуктов обработки, что значительно усложняет процедуры оптимизации режимов озонирования воздуха в овощехранилище.

5. Обосновано, что для оптимизации режимов озонирования необходимо разработать адаптивные прогнозирующие модели технологического процесса озонирования при хранении сельскохозяйственной продукции, а также условия идентифицируемости объекта управления для синтеза алгоритма идентификацию

6. На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи данного диссертационного исследования.

7. Результаты исследований представленных в первом разделе, опубликованы нами в [44, 76, 87].

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И РАЗРАБОТКА ОЗОНАТОРОВ НА ОСНОВЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА МИКРОЭЛЕКТРОДАХ

2.1 Обоснование и выбор способа и метода расчета параметров в озонаторах коронного разряда

Процессы образования и потери озона в отрицательной короне. Коронный разряд возникает в газовой среде при подаче на электроды достаточно высокого напряжения. При этом коронирующий электрод выполняется в виде иглы, тонкого провода, что позволяет создать на нем зону ионизации. Как правило, на коронирующий электрод подается отрицательный потенциал. Электроны из зоны ионизации при движении к аноду прилипают к нейтральным атомам и молекулам газа, образуя отрицательные ионы. Эти ионы под воздействием электрического поля во внешней области коронного разряда при движении к аноду создают разрядный ток [47].

Основные ионизационные процессы в коронном разряде протекают в области повышенной напряженности поля (в коронирующем слое), которая лежит вблизи поверхности электрода с малым радиусом кривизны (провод, острие и т.д.) [47]. При некотором напряжении между электродами начинают возникать отдельные электронные лавины или группы лавин. С повышением напряжения и достижением начальной напряженности поля короны (E_0) эти лавины вызывают появление достаточного числа свободных электронов, дающих начало новым лавинам. Ток разряда резко возрастает, устанавливается режим самостоятельного разряда. Для расчета параметров отдельных лавин, а также для установления критерия самостоятельности разряда обычно используются ионизационные коэффициенты Таунсенда α и γ .

Для образования озона наиболее благоприятные условия создаются в отрицательной короне, протекающей в атмосферном воздухе, кислороде и их смесях с другими газами. При этом электроны имеют высокие энергии в ионизационной области, тогда как молекулы газа во внешней области короны находятся в состоянии тепловой энергии.

Отношение плотности электронной составляющей тока короны j на расстоянии r к начальной j_0 на границе зоны ионизации r_i определяется для цилиндрической системы электродов следующим выражением [53]:

$$\frac{j}{j_0} = \exp\left[-nQ\frac{2\varepsilon}{m_e} \cdot \frac{r}{V_e}\right], \quad (2.1)$$

где n – концентрация нейтральных молекул кислорода; Q – суммарное поперечное сечение взаимодействия электронов; ε – энергия электронов; m_e – масса электронов; V_e – скорость электронов, выходящих из зоны ионизации коронного разряда.

Расчеты, выполненные в работе [51] по этой формуле, дали следующие результаты: для кислорода на расстоянии $r = 0,3$ мм это отношение составило $j/j_0 = e^{-30}$, в то время как для воздуха на расстоянии $r = 0,65$ мм оно получилось равным $j/j_0 = 0,5$. Действительно можно отметить, что электронная компонента

суммарного тока короны пренебрежимо мала в кислороде и внушительна в воздухе. Существенный вклад электронов в общий ток короны в атмосферном воздухе также отмечены другими авторами [54].

В таблице 2.1 представлены наиболее часто встречающиеся химические реакции в зоне отрицательной короны в атмосферном воздухе.

Таблица 2.1 – Реакции образования и разложения озона в отрицательной короне

№ пп	Реакции	K	№ пп	Реакции	K
1	$O + O_2 = O_3 + e$	$3 \cdot 10^{-10}$	9	$O_2^- + O_2 = 2O_2 + e$	$2,2 \cdot 10^{-14}$
2	$O + O_3 = O_2^- + O_2$	$1,1 \cdot 10^{-11}$	10	$O_2^- + O = O_3 + e$	$3,3 \cdot 10^{-10}$
3	$O + O_3 = O_3^- + O$	$3,5 \cdot 10^{-10}$	11	$O_3^- + O = O_2^- + O_2^+$	$9 \cdot 10^{-15}$
4	$O + O_3 = 2O_2 + e$	$3,2 \cdot 10^{-10}$	12	$O_3 + O_2 = O + 2O_2$	$1,9 \cdot 10^{-27}$
5	$O + O = O_2 + e$	$3 \cdot 10^{-10}$	13	$O + 2O_2 = O_3^- + O_2$	$1 \cdot 10^{-30}$
6	$O + O_2 = O_2^- + O$	$5 \cdot 10^{-10}$	14	$O + 2O_2 = O_3 + O_2$	$5,5 \cdot 10^{-31}$
7	$O_2^- + O_3 = O_3^- + O_2$	$3,3 \cdot 10^{-10}$	15	$O_2^- + 2O_2 = O_4^- + O_2$	$1,5 \cdot 10^{-31}$
8	$2O + O_2 = O_2 + O_2$	$1,5 \cdot 10^{-35}$	16	$O_4^- + O = O_3^- + O_2$	$4 \cdot 10^{-10}$

С помощью приведенных элементарных процессов образования и потери электронов и ионов может быть составлена система уравнений непрерывности для всех заряженных и нейтральных атомов и молекул кислорода в условиях отрицательной короны в атмосферном воздухе [55]. Введем следующие обозначения: K_1 и K_2 - константы скорости реакции образования и потери электронов, ионов и O_3 (принято $\approx 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$); n_1, n_2, n_3 - плотности O, O_2 и O_3 (см^{-3}); n_4, n_5, n_6, n_7 - плотности e, O^-, O_2^- и O_3^- ; k_1, k_2, \dots, k_4 - соответственно их подвижности. Для примера приведем уравнения непрерывности для электронов (n_4), ионов O^- (n_5), O_2^- (n_6) и O_3^- (n_7):

$$\kappa_1 E \frac{dn_4}{dr} = (n_5 n_3 + n_5 n_2 + n_5 n_1 + n_6 n_2 + n_6 n_1) K_{14} - (n_4 n_1 + 2n_4 n_2 + n_4 n_3) K_{24},$$

$$\hat{e}_2 E \frac{dn_5}{dr} = (n_4 n_2 + n_7 n_4 + n_4 n_1) K_{15} - (n_5 n_2 + n_5 n_3 + n_5 n_1) K_{25}, \quad (2.2)$$

$$\kappa_3 E \frac{dn_6}{dr} = (n_5 n_2 + n_5 n_3) K_{16} - (n_6 n_3 + n_6 n_1 + n_6 n_2) K_{26},$$

$$\kappa_4 E \frac{dn_7}{dr} = (n_5 n_3 + n_6 n_3) K_{17} - (n_7 n_2 + n_7 n_1) K_{27},$$

где E - напряженность электрического поля во внешней области короны.

В этих уравнениях использованы дополнительные реакции для потерь e, O_3^- которые не вошли в таблицу 2.1. Уравнение непрерывности в общем виде выглядит следующим образом

$$\kappa_i E \frac{dn_i}{dr} = K_{1i} \sum_{l,m}^7 n_l n_m - K_{2i} \sum_s^7 n_s n_i, \quad (2.3)$$

где κ_i - подвижность; K_{1i} , K_{2i} - константы скорости реакции; n_i - плотность i - заряженной компоненты потока ионов, а s - их потери.

Ввиду того, что в реакциях образования и потери участвуют атомы и молекулы (O , O_2 , O_3), электроны (e) и отрицательные ионы (O^- , O_2^- , O_3^-) кислорода индексы l , m , s могут иметь значения от 1 до 7. Индексом i обозначаются заряженные частицы, и поэтому в соответствии с нашими обозначениями он имеет значения от 1 до 4 [55].

В частности, используя уравнение (2.3) можно показать изменение плотности электронов во времени в разрядном промежутке

$$n_4 = n_0 \exp \int_{t_0}^t \left(K_{14} \sum_{l,m}^7 \frac{n_l n_m}{n_l + n_m} - K_{24} \sum_s^7 \frac{n_4 n_s}{n_4 + n_s} \right) dt, \quad (2.4)$$

где n_0 - плотность электронов на границе коронирующего слоя (r_i); t_0 - начальное время старта электронов.

Общий смысл степени экспоненты (2.4) означает: 1-й член – частота образования новых электронов из-за процессов отрыва, 2-й – общепринятая частота прилипания, наличие первого члена растягивает хвост экспоненты n_4 в сторону внешней области короны, что существенно увеличивает среднюю подвижность отрицательных ионов.

Общее рассмотрение системы уравнений (2.3) позволяет сделать следующие выводы: значение плотности электронов во внешней области разряда мало (> 7 -8мм) и стремится к нулю у наружного электрода: ионы O^- имеют высокую плотность вблизи границы коронирующего слоя (возможно, максимум), которая постепенно падает: плотности ионов O_2^- и O_3^- у наружного электрода составляют 0,5 и 0,3 части общего тока коронного разряда. Оценочные расчеты плотностей ионов O^- , O_2^- , O_3^- по формуле (2.3) для нормальных атмосферных условий дают следующие отношения между ними [56]

$$\frac{[O_2^-]}{[O^-]} = 1,72; \quad \frac{[O_2^-]}{[O_3^-]} = 1,32; \quad \frac{[O_3^-]}{[O^-]} = 1,28. \quad (2.5)$$

Описанная картина взаимосвязи химических реакций в зоне короны может несколько измениться, если будут рассмотрены процессы, протекающие с участием возбужденных атомов и молекул кислорода и азота. Между тем, результаты анализа данных таблицы 2.1 и решения уравнений (2.3-2.5) позволяют получить качественную картину распределения плотности озона в разрядной зоне отрицательной короны, а также конкретизировать те элементарные процессы, которые участвуют в образовании и потере озона [58].

Таким образом, описан механизм образования и разложения озона в газовой фазе, охватывающий основные физико-химические процессы в коронном разряде. С учетом коэффициента прилипания электронов и подвижностей отрицательных ионов установлены энергии свободных

электронов в коронирующем слое и вне зоны ионизации. Составлена система уравнений непрерывности для всех заряженных и нейтральных атомов и молекул кислорода и озона в условиях отрицательной короны в атмосферном воздухе.

Достаточно сложная схема целого ансамбля реакций образования и потери озона затрудняет рассчитывать на количественные данные и не дает полную картину процессов в чехле короны. Поэтому, в данный момент является единственным путем исследования – это качественная интерпретация общего хода электрохимических процессов и обсуждение их по результатам измерения внешних электрических характеристик разряда (импульсы Тричеля, разделение электронной и ионной составляющих импульса).

На рисунке 2.1 представлена качественная картина кривых распределения плотности (n) ионов озона и других носителей тока в относительных единицах.

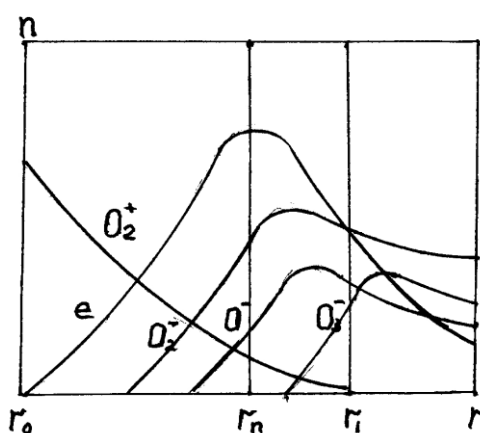


Рисунок 2.1 - Распределение плотности ионов озона (n) в чехле короны

Основанием для построения зависимостей распределения плотности ионов озона и других заряженных частиц от расстояния до коронирующей проволоки послужили следующие обстоятельства [65]:

1. Данные качественной интерпретации при рассмотрении структуры чехла короны.
2. Расчетные данные кинетических уравнений, описывающих элементарные процессы в чехле короны.
3. Диаграмма электрохимических реакций в чехле короны, причастных к синтезу озона.

Эти обстоятельства существенно дополняются в пространственно-временном плане рассмотрением одиночной электронной лавины, характерной для отрицательной короны на МП. Ионизационный процесс, начатый одним или несколькими электронами на поверхности проволоки, бурно развивается дальше, распространяясь до границы коронирующего слоя, находящегося на расстоянии $0,3\sqrt{r_0}$. По современным данным электронная лавина представляет собой почти симметрично-сферическое расширяющееся облако, за которым тянется след ионизированных и возбужденных атомов и молекул, симметричный относительно направления внешнего электрического поля [58].

Для определения параметров электронных лавин обычно используют электрический метод, измеряя характеристики импульсов тока на электродах разряда (импульсы Тричеля), что позволяет разделить электронную (фронт импульса) и ионную (длительность импульса) составляющие электронных лавин. Здесь также затруднительно судить об объёме вклада ионов озона в суммарный разрядный ток и определить количество производимого в разряде озона [59].

Решение данной задачи с помощью системы уравнений непрерывности для заряженных частиц, в данный момент не представляется возможным, так как отсутствуют начальные условия для ионов и в уравнениях присутствуют также плотности нейтральных атомов и молекул кислорода и озона. Кроме того, составление балансов ионов по электрохимическим реакциям приводит к еще более громоздкому материалу и, в конечном итоге, к неопределенности решения задачи.

Таким образом, остаётся практически единственный путь определения количества озона, – это экспериментальное измерение концентраций озона в воздухе или в газе, продуваемого через разрядный промежуток.

Поэтому более приемлемым является путь определения плотности ионов в разрядном промежутке, в том числе и ионов озона, через величину разрядного тока, которая может быть измерена и определена по вольтамперным характеристикам разряда. Для цилиндрической системы электродов величина тока униполярной короны определяется по известной формуле [60]

$$I = 2\pi r n e k E \Phi, \quad (2.6)$$

где r – расстояние от оси цилиндрической системы электродов, см; n – плотность ионов, см⁻³; k – подвижность ионов, см²/В·с; E – напряженность поля во внешней области короны, В/см; e – заряд электрона, 1,6·10⁻¹⁹ Кл.

Для корректности решения задачи сделаем ряд допущений:

1. Во внешней зоне короны отсутствуют процессы и реакции, которые меняли бы сортность или плотность ионов, причем по радиусу цилиндра соблюдается соотношение $n_1 r_1 = n_2 r_2$.

2. Во внешней зоне короны подвижности ионов O , O_2^- , O_3^- приняты постоянными и равными соответственно $k_1 = 3,2$, $k_2 = 2,24$ и $k_3 = 2,54$ см²/В·с.

3. При допущении постоянства подвижности ионов напряженность электрического поля во внешней зоне униполярной короны приближенно описывается уравнением [61]

$$E = \sqrt{I / 2\pi \varepsilon_0 k + E_0^2 r_0^2 / r^2}, \quad (2.7)$$

где E_0 – начальная напряженность поля короны, которая определяется по формуле Пика [62], В/см; r_0 – радиус коронирующей МП, см; ε_0 – диэлектрическая постоянная, Ф/см.

В связи с тем, что второй член под корнем $E_0^2 r_0^2 / r$ является малой величиной по сравнению с первым членом, E во внешней области имеет постоянное значение и зависит только от I .

Теперь, введя для удобства обозначения плотности ионов O^+ , O_2^- и O_3^- в виде n_1, n_2 и n_3 соответственно, запишем уравнение (10) следующим образом

$$I = 2\pi r_i e E (k_1 n_1 + k_2 n_2 + k_3 n_3), \quad (2.8)$$

и если воспользоваться соотношениями для расчетов, то получим $n_2 = 1,32n_3$. После подстановки их в уравнение (11) и некоторых операций определяем выражение для плотности ионов озона [68]

$$n_3 = \frac{I}{2\pi r_i e E \left(\frac{k_1}{1,28} + 1,32k_2 + k_3 \right)}, \quad (2.9)$$

где r_i - радиус границы коронирующего слоя, равный $0,3\sqrt{r_0}$ см.

Расчеты по этой формуле для озонирующей ячейки со следующими параметрами $r_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ см, $r_i = 0,3\sqrt{r_0}$ см, $I = 0,166 \cdot 10^{-3}$ А/см, $E = 12$ кВ/см дают $n_3 = 8,19 \cdot 10^{10}$ см³; $n_2 = 10,8 \cdot 10^{10}$ см³; $n_1 = 6,4 \cdot 10^{10}$ см³.

Математическая модель ионизационных процессов в зоне коронного разряда. Результаты ряда экспериментальных исследований униполярной короны в цилиндрической системе электродов, например, измерение подвижности ионов во внешней области, ВЧ-диагностика зоны ионизации коронного разряда и т.д., показали, что коронирующий слой или чехол короны является ключевым, определяющим все характерные особенности разряда в целом [45]. Ионизационные процессы в коронном разряде (ионизация, возбуждение, рекомбинация, диффузия, прилипание электронов и т.д.) протекают, в основном, в чехле короны вблизи электрода с малым радиусом кривизны.

В связи с этим, ставится задача: математическое описание структуры чехла короны и моделирование процессов в зоне ионизации через решения системы дифференциальных уравнений с учетом диффузии ионов и электронов.

В работе [66] дана теоретическая постановка и анализ одномерной модели течения газа (жидкости) с игольчатым электродом. Также разработана двумерная математическая модель коронного разряда как функцию параметров газовой среды, напряжения питания и конструктивных параметров коронно-разрядного промежутка [67].

Следует отметить, что в работах [66, 67] не учитывается вклад диффузионного тока, возникающего из-за больших плотностей ионов и электронов в чехле короны. Кроме того, в них не четко определена внешняя граница разрядной зоны, в том и в другом случае она очерчена параболой или параболоидом, проходящих через начало координат (коронирующий электрод) и край внешнего электрода. В этом случае, несмотря на большие удобства расчета моделей, искусственно ограничивается пространство развития и распространения разрядных процессов.

Наиболее выгодным для исследования униполярного коронного разряда является форма электродов в виде осесимметричных цилиндров, где коронирующим электродом служит микропроволока, а внешним электродом –

металлический цилиндр, охваченный с двух сторон охранными электродами аналогичной формы для исключения краевых эффектов электростатического поля измерительного электрода. Длина измерительного электрода $L = 1$ см, диаметр его может меняться от 10 до 20 мм, а диаметр микропровода – от 10 до 100 микрон [68].

Ввиду недостатка экспериментальных работ, посвященных изучению свойств коронирующего слоя, механизм элементарных процессов в чехле короны и их влияние на ту или иную характеристику униполярной короны не выяснены. Между тем, чтобы определить распределение E и ρ в коронирующем слое, когда возможно существование их высоких градиентов, необходимо рассматривать процессы переноса ионов и электронов с учетом их диффузии. Эта задача, без учета процессов диффузии, была последовательно решена Капцовым. Приводим это решение для отрицательной короны, когда учитывается диффузия отрицательных и положительных ионов и электронов.

Динамику процессов в коронирующем слое можно описать следующей системой уравнений [69]:

$$\operatorname{div} E = \frac{\rho}{\varepsilon_0} = \frac{\rho_+ - \rho_- - \rho_e}{\varepsilon_0}; \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} j &= (k_+ \rho_+ + k_- \rho_- + k_e \rho_e) E - D_+ \nabla \rho_+ - D_- \nabla \rho_- - D_e \nabla \rho_e; \\ \operatorname{div} j &= 0 = k_+ \rho_+ \operatorname{div} E + E k_+ \operatorname{grad} \rho_+ + k_- \rho_- \operatorname{div} E + E k_- \operatorname{grad} \rho_- + k_e \rho_e \operatorname{div} E + \\ &+ E k_e \operatorname{grad} \rho_e + D_+ \nabla \rho_+ - D_- \nabla \rho_- - D_e \nabla \rho_e; \\ j &= j_+ + j_- + j_e, \end{aligned}$$

где j_+ , j_- , j_e – плотности тока, приходящиеся на долю каждого рода заряженных частиц; ρ_+ , ρ_- , ρ_e плотности объемных зарядов.

Если известна суммарная плотность объемного заряда ρ , то подстановка ее в (1) и решение его относительно E дает нам распределение напряженности поля в коронирующем слое.

Если плотность тока электронов, выходящих из поверхности коронирующей проволоки обозначить j_1 , то воспользуясь вторым коэффициентом Таунсенда, получим

$$j_1 = j_+ = \gamma(j - j_1), \quad (2.11)$$

$$j_1 = j \frac{\gamma}{1 + \gamma}, \quad (2.12)$$

где принято при $\gamma = \gamma_0$, $j = j_e + j_+$, $j_- = 0$.

При учете не только электронного тока j_e , но и той доли тока, переносимой отрицательными ионами, закон нарастания лавин запишется следующим образом

$$j_- + j_e = j_1 \exp\left(\int_{r_0}^r \alpha dr\right) = j \frac{\gamma}{1 + \gamma} \exp\left(\int_{r_0}^r \alpha dr\right). \quad (2.13)$$

При развитии электронных лавин от коронирующей проволоки образование отрицательных ионов начинается где-то внутри коронирующего

слоя на расстоянии r_n от оси провода при определенной напряженности поля E_n . По мере дальнейшего продвижения электронных лавин число отрицательных ионов будет возрастать. Если через b обозначить отношение плотности тока отрицательных ионов к общему току, приходящемуся на долю всех отрицательных носителей зарядов, то можно записать

$$b = \frac{j}{j_- + j_e}, \quad (2.14)$$

$$j = b(j_- + j_e) = j \frac{\gamma}{1+\gamma} b \exp\left(\int_{r_0}^r \alpha dr\right), \quad (2.15)$$

где принято при $r < r_n$, $b = 0$; при $r > r_n$, $b = 1$.

Для силы токов отдельных компонентов заряженных частиц имеем:

$$I_+ = 2 \pi r j_+ = 2 \pi r k_+ \rho_+ E - 2 \pi r D_+ \nabla \rho_+,$$

$$I_- = 2 \pi r j_- = 2 \pi r k_- \rho_- E - 2 \pi r D_- \nabla \rho_-,$$

$$I_e = 2 \pi r j_e = 2 \pi r k_e \rho_e E - 2 \pi r D_e \nabla \rho_e,$$

сумма которых означает всю силу тока с единицы длины коронирующего провода

$$I = I_+ + I_- + I_e,$$

Причем она складывается в области наружного участка коронирующего слоя из силы тока положительных ионов I_+ , силы тока отрицательных ионов I_- и из силы электронного тока I_e . Используя соотношения (2.11-2.15), можно получить

$$I_+ = I - I \frac{\gamma}{1+\gamma} \exp\left(\int_{r_0}^r \alpha dr\right),$$

$$I_- = I \frac{\gamma}{1+\gamma} b \exp\left(\int_{r_0}^r \alpha dr\right),$$

$$I_e = (1-b) I \frac{\gamma}{1+\gamma} \exp\left(\int_{r_0}^r \alpha dr\right),$$

тогда для распределения объемных зарядов в коронирующем слое получим следующие линейные дифференциальные уравнения:

$$\rho_+' - \frac{k_+}{D_+} E \rho_+ + \frac{I}{2 \pi r D_+} \left[1 - \frac{\gamma}{1+\gamma} \exp\left(\int_{r_0}^r \alpha dr\right) \right] = 0, \quad (2.16)$$

$$\rho_-' - \frac{k_-}{D_-} E \rho_- + \frac{I}{2 \pi r D_-} \cdot \frac{\gamma}{1+\gamma} b \exp\left(\int_{r_0}^r \alpha dr\right) = 0, \quad (2.17)$$

$$\rho_e' - \frac{k_e}{D_e} E \rho_e - \frac{I}{2 \pi r D_e} \cdot \frac{\gamma(1-b)}{1+\gamma} \exp\left(\int_{r_0}^r \alpha dr\right) = 0. \quad (2.18)$$

Для упрощения записи при решении уравнений (7-9) введем следующие обозначения

$$a_+ = \frac{k_+}{D_+}, \quad a_- = \frac{k_-}{D_-}, \quad a_e = \frac{k_e}{D_e}, \quad E = -\frac{d\phi}{dr},$$

$$\frac{\gamma}{1+\gamma} = A, \quad \int_{r_0}^r a dr = \ln \frac{\gamma}{1+\gamma} = \ln A,$$

причем при учете граничных условий ($r=r_0$), когда постоянные интегрирования будут равны нулю, решения этих уравнений примут более наглядный вид:

$$\rho_+ = \frac{I}{2\pi D_+} (Ae^{\ln A} - 1) e^{\alpha_+(\varphi-\varphi_0)} \int_{r_0}^r e^{-\alpha_+(\varphi-\varphi_0)} \frac{dr}{r}, \quad (2.19)$$

$$\rho_- = \frac{-IbA}{2\pi D_-} e^{\ln A + \alpha_-(\varphi-\varphi_0)} \int_{r_0}^r e^{-\alpha_-(\varphi-\varphi_0)} \frac{dr}{r}, \quad (2.20)$$

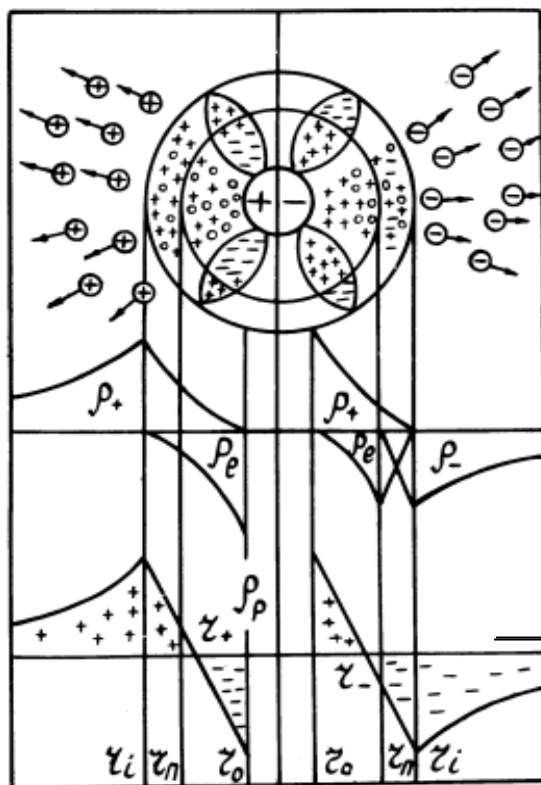
$$\rho_e = -\frac{I(1-b)A}{2\pi D_e} e^{\ln A + \alpha_e(\varphi-\varphi_0)} \int_{r_0}^r e^{-\alpha_e(\varphi-\varphi_0)} \frac{dr}{r}. \quad (2.21)$$

Суммарный объемный заряд ρ , полученный из этих данных позволит при подстановке его в уравнения (2.10) определить распределения напряженности поля и потенциала в коронирующем слое. Следует отметить, что решение дифференциальных уравнений поля униполярной короны сильно усложняется при учете диффузии ионов и электронов.

Определение плотности объемных зарядов по формулам (2.19-2.21), в основном, решает вопрос о распределении концентрации ионов и электронов в коронирующем слое. Анализ их показывает, что распределение ρ_+, ρ_-, ρ_e по радиусу носят экспоненциальный характер. Если величина ρ_+ постепенно падает к наружному участку, доходя до нуля при $r = r_i$, то плотность объемного заряда отрицательных ионов будет увеличиваться, начиная с нуля при $r \geq r_n$ до максимума при $r = r_i$. Плотность электронов увеличивается до максимума, когда радиус доходит до r_n , а с образованием отрицательных ионов $r \geq r_n$, падает до минимума.

Таким образом, при отрицательной короне отрицательные ионы начинают интенсивно образовываться в области (r_i-r_n) и далее продвигаются во внешнюю область коронного разряда [70]. При положительной короне отрицательные ионы, образованные в результате прилипания свободных электронов к нейтральным молекулам и атомам, при подходе к границе внутреннего участка (r_n), разрушаются и поставляют свободные электроны для поддержки лавинного процесса в чехле короны. Если принять за основу, то обстоятельство, что все отрицательные ионы разрушаются при $E \geq 35-40$ кВ/см, то следует предположить существование независимо от полярности коронирующего электрода, наличие участка коронирующего слоя (r_n-r_0), где совсем отсутствуют отрицательные ионы.

На основе анализа уравнений (2.19-2.21) и экспериментальных данных получена качественная картина структуры чехла короны и установлено распределение ионов и электронов в коронирующем слое для обеих полярностей униполярной короны (рисунок 2.2). На рисунке показано развитие отдельных электронных лавин в чехле положительной и отрицательной короны, причем маленькими кружочками обозначены электроны.



Распределение плотности положительных (ρ_+) и отрицательных (ρ_-) ионов, электронов (ρ_e) и результирующего объемного заряда (ρ_p)

Рисунок 2.2 - Структура чехла униполярной короны

При стационарной униполярной короне из-за наложения и перекрытия большого количества, одновременно возникающих электронных лавин в коронирующем слое устанавливается динамическое равновесие распределения плотности ионов и электронов, т.е. каждой точке разрядного промежутка соответствуют определенные значения ρ_+, ρ_-, ρ_e .

Результаты наших экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности дополнительных элементарных механизмов, например, диффузии или увеличения подвижности ионов, которые усиливают силу тока короны в разряде с малым межэлектродным расстоянием. Также известно [45], что распределение плотности заряда по радиусу цилиндрической камеры неравномерно, то есть существует градиент концентрации ионов во внешней области короны. Поэтому несомненный интерес представляет анализ дифференциальных уравнений униполярной короны с учетом диффузии ионов.

На основе полученных экспериментальных результатов и теоретических предпосылок показана возможность аналитического решения дифференциальных уравнений униполярной короны, когда учитываются влияния диффузии ионов и переменный характер плотности объемного заряда. Аналитический путь решения задачи, если с одной стороны представляет методический интерес, то с другой стороны, он, в наибольшей степени,

способствует пониманию природы явления и других внутренних механизмов, протекающих в зоне униполярной короны [71].

Рассмотрим униполярную корону в цилиндрической системе электродов, когда во внешней области разряда присутствует униполярный поток ионов с некоторым распределением плотности $\rho(r)$ по радиусу. Полная система дифференциальных уравнений, описывающая электрическое поле во внешней области коронного разряда, имеет следующий вид:

$$\nabla^2 \varphi = -\rho / \varepsilon_0, \quad (2.22)$$

$$\operatorname{div} j = 0, \quad (2.23)$$

$$j = \kappa \rho E - D \nabla \rho, \quad (2.24)$$

где первое выражение представляет собой уравнение Пуассона, которое устанавливает связь между плотностью объемного заряда ρ и потенциалом поля φ ; второе выражение – известное уравнение непрерывности тока; третье уравнение выражает связь плотности тока j с напряженностью поля ($E = -\nabla \varphi$), плотностью объемного заряда с градиентом $\nabla \rho$.

Система уравнений (2.22-2.24) без учета диффузии ионов решается обычно при известных граничных условиях и допущениях: потенциалы поля у электродов равны $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = U$; толщиной коронирующего слоя пренебрегают; напряженность на поверхности коронирующего электрода принимают равной начальной независимо от интенсивности коронного разряда; величину подвижности ионов считают постоянной во всем разрядном промежутке. Для случая, когда задача решается для внешней области униполярной короны, эти допущения и граничные условия также остаются в силе.

Для электродов в виде концентрических цилиндров, когда все процессы зависят от одной координаты, известны соотношения:

$$\operatorname{div} E = \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} (Er), \quad (2.25)$$

$$j = \frac{I}{2\pi r}, \quad (2.26)$$

$$E = -\nabla \varphi = -\frac{d\varphi}{dr}, \quad (2.27)$$

где I – суммарный ток с единицы длины коронирующей проволоки. Здесь ρ , E и φ зависят только от координаты r .

Рассмотрим анализ дифференциальных уравнений униполярной короны с учетом диффузии ионов. Для этого исходя из системы уравнений (2.25-2.27) запишем следующие уравнения:

$$\frac{I}{2\pi r} = \kappa \rho E - D \frac{d}{dr} \rho, \quad (2.28)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (Er) = \frac{\rho}{\varepsilon_0}. \quad (2.29)$$

После подстановки (8) в (7) получим

$$\frac{I}{2\pi r} = \frac{\varepsilon_0 \kappa}{r} E \frac{d}{dr}(Er) - D\varepsilon_0 \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr}(Er) \right], \quad (2.30)$$

и если ввести следующие сокращения

$$\lambda^2 = \frac{\kappa}{2D}; \quad \ell^2 = \frac{I\lambda^2}{4\pi D\varepsilon_0}; \quad y = Er,$$

то (2.30) преобразуется в

$$-r \frac{d^2}{dr^2} y + \frac{d}{dr} y + \lambda^2 \frac{d}{dr} y^2 = \frac{2\ell^2}{\lambda^2} r$$

Первый интеграл этого уравнения будет равен

$$-r \frac{d}{dr} y + y + \lambda^2 y^2 = \frac{\ell^2}{\lambda^2} r^2 + c_1 \quad (2.31)$$

Рассмотрим случай большого r . Если пренебречь $\frac{dy}{dr}$ и y по сравнению с y^2 , то из (2.31) следует

$$y \approx \frac{1}{\lambda^2} \sqrt{\frac{\ell^2}{\lambda^2} r^2 + c_1},$$

и для E получим

$$E = \sqrt{\frac{I}{2\pi\varepsilon_0\kappa} + \frac{c_1}{\lambda^2 r^2}} \quad (2.32)$$

Лучшее асимптотическое приближение можно получить, если представить в виде ряда

$$y = ar + a_0 + \frac{a_1}{r} + \frac{a_2}{r^2} + \dots$$

и тогда выражение для E запишется

$$E = \sqrt{\frac{I}{2\pi\varepsilon_0\kappa} - \frac{D}{kr} + \dots O\left(\frac{1}{r^2}\right)} \quad (2.33)$$

Без влияния диффузии ионов получаем

$$E = \sqrt{\frac{I}{2\pi\varepsilon_0\kappa} - \frac{c^2}{r^2} + \dots} \quad (2.34)$$

которое близко совпадает с (2.32). Таким образом, следует отметить, что при больших значениях r влияние диффузии ионов исчезающее мало. При этом распределение E соответствует практически распределению при чистом дрейфовом токе коронного разряда [71].

Если при стационарной униполярной короне выполняются следующие условия

$$r \rightarrow R; \quad \kappa/D \approx 40; \quad I \gg 0,$$

то исходя из выражений (2.31) и (2.34) можем считать, что вблизи наружного электрода напряженность поля постоянна и равна

$$E \approx \sqrt{\frac{I}{2\pi\varepsilon_0\kappa}}, \quad (2.35)$$

Тогда с помощью этой формулы и выражения (2.29) определяется распределение объемного заряда по радиусу

$$\sqrt{\frac{E}{r}} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}; \quad \rho = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{I\varepsilon_0}{2\pi k}}, \quad (2.36)$$

а на поверхности наружного электрода значения ρ и φ будут равны

$$\rho = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{I\varepsilon_0}{2\pi k}}; \quad \varphi = R \sqrt{\frac{I}{2\pi k\varepsilon_0}}, \quad (2.37)$$

где R – радиус наружного электрода.

Отсюда следует, что когда значение φ прямо пропорционально R , плотность объемного заряда обратно пропорциональна R . Это означает постоянство значений их произведений

$$\rho\varphi = \frac{I}{2\pi k}, \quad (2.38)$$

которое зависит только от силы тока коронного разряда и от подвижности ионов. При токе $I = 100 \text{ мкА/см}$ и $R = 0,5 \text{ см}$ для ρ получаем значение порядка $1,6 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/см}^3$. Воспользуясь формулами (2.30) и (2.37), произведем оценочные расчеты диффузионной составляющей плотности тока j_D по сравнению с J_E . Расчеты j_D вблизи наружного электрода могут быть выполнены по формуле

$$J_D = D \nabla \rho = \frac{D}{R^2} \sqrt{\frac{I\varepsilon_0}{2\pi k}}, \quad (2.39)$$

что дает для положительной короны $J_D = 0,093 \cdot 10^{-2} \text{ мкА/см}^2$, а для отрицательной – $0,144 \cdot 10^{-2}$. Значения токов коронного разряда могут меняться из-за диффузии ионов на $0,27 \cdot 10^{-2}$ и $0,45 \cdot 10^{-2} \text{ мкА/см}$ соответственно, причем значения коэффициентов диффузии взяты табличные данные $D_+ = 0,028$, $D_- = 0,043 \text{ см}^2/\text{с}$.

Из кинетической теории может быть также найдено среднее смещение ионов за счет диффузии

$$X = 2 \sqrt{\frac{Dt}{\pi}}, \quad (2.40)$$

где t – время дрейфа ионов.

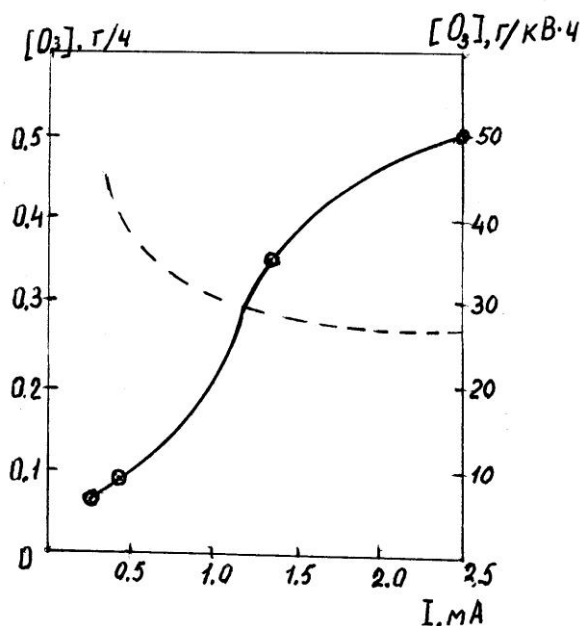
Если расчеты вести исходя из расплывания ионного облака лавины и считая значение E постоянным во внешней области коронного разряда, то по формуле (2.40), когда в нашем случае время дрейфа составляет 100 мкс, получим среднее смещение ионов из-за диффузии равное 8-10 микрон. Таким образом, результаты оценочных расчетов J_D позволяют заключить, что процесс диффузии ионов во внешней области коронного разряда не имеет существенного влияния. Необходимость учета диффузии ионов при решении дифференциального уравнения (2.28) обычно определяют выражением D/RkE , соизмеримых с единицей [71].

Результаты теоретических и экспериментальных работ последних лет показали, что отрицательный коронный разряд с микроэлектродами (микропроволока, игла (острие), острые кромки и тонкая спираль с радиусами кривизны не более 25–50 мкм) по сравнению с другими видами коронного разряда обеспечивает более высокий удельный ток разряда и большую

плотность тока на коронирующем электроде [72]. На основе полученных данных разработаны новые озонаторы на коронном разряде (ОКР), которые существенно не отличаются по своему энергетическому выходу озона (до 50 г/кВт·ч) от известных озонаторов со средней производительностью озона (10 – 100 г/ч) и в то же время имеют следующие преимущества: простота конструкции и малые габариты, слабое влияние давления и скорости протекающего воздуха на их характеристики, экологическая безопасность и отсутствие воздухоподготовки, малая металлоемкость и малый вес [45].

При всех преимуществах в своем классе (малогабаритность, удобство и простота обращения и обслуживания, не требующая высокой квалификации обслуживающего персонала) озонаторы типа ОКР обладают рядом недостатков, не позволяющее использовать их в качестве озонирующих элементов при разработке промышленных озонаторов для получения большого объема озона (5–10 кг/ч), причем не считая отдельных модификаций, озонаторы на коронном разряде в большинстве случаев имеют низкие энергетические выходы озона (г/кВт·ч) [41, 74, 75].

Производительность по озону (г/ч) озонатора или озонирующего элемента определялась по градуировочной кривой, снятая с помощью озонметра типа ЛЭК разработки Санкт-Петербургского технического университета. На рисунке 2.3 приведена зависимость производительности трубчатого озонатора от значения разрядного тока (P_n) и расчетные значения удельного энергетического выхода по озону (P_y).



Сплошные линии – производительности (г/ч), штриховая – энергетический выход озона (г/кВт·ч)

Рисунок 2.3 – Производительность и энергетический выход озонирующего элемента

Озонатор имел следующие параметры: $L=150$ мм, $D=100+26$ микрон (спиральная). Расход продуваемого воздуха через озонатор составил 20 л/мин. Как следует из этого рисунка, с ростом величины разрядного тока производительность озонатора по озону также растет, в то время как энергетический выход его монотонно падает, подтверждает ранее известные данные по росту энергетического выхода озона при малых токах коронного разряда [77].

Таким образом, производительность по озону озонирующего элемента (г/ч) измерением на его выходе концентраций озона известным стандартным озонометром или определяется по градуировочной кривой (рис.2.3), тогда как это энергетический выход находится расчетным путем через количество выработанного озона (г) на единицу затрачиваемой электроэнергии (кВт·ч). Отсюда следует, что снижение удельных энергозатрат (г/кВт·ч) необходимо при многозвенных и многомодульных соединениях озонирующих элементов с целью повышения суммарной производительности озона озонатором [76].

Производительность по озону любого озонирующего элемента, в первую очередь, зависит от величины разрядного тока, и потому, для снижения удельных энергозатрат возникает возможность, уменьшения значений питающего напряжения при тех же токах разряда. Имеются несколько путей для усиления тока коронного разряда, которые ведут к повышению производительности озонирующего элемента. Рассмотрим их возможности, достоинства и недостатки при применении их в озонирующих элементах.

1 Одним из путей усиления тока коронного разряда, что равносильно повышению производительности озонирующего элемента, является уменьшение межэлектродного расстояния разрядного промежутка. В этом случае при тех же напряжениях питания возможно получить более высокие значения разрядного тока, если при этом не возникнет пробой между электродами.

В коаксиальных цилиндрах существует геометрический предел отношения внешнего радиуса к внутреннему, равный e (основание натурального логарифма), ниже которого коронный разряд не может возникнуть [44]. Рассмотрим напряженность поля на поверхности внутреннего электрода:

$$E_0 = \frac{U_0}{r_0 \ln \frac{R}{r_0}}, \quad (2.41)$$

где U – напряжение между электродами; R – радиус внешнего цилиндра; r_0 – радиус внутреннего цилиндра. Если принять значения U и R постоянными, то можно найти r_0 при минимальной E_M когда более вероятен пробой промежутка:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{E_M} \right) &= \frac{d}{dr} \left[\frac{r}{U_M} (\ln R - \ln r) \right] = 0; \\ \frac{1}{U_M} (\ln R - \ln r - 1) &= 0; \ln \frac{R}{r} = 1; \end{aligned} \quad (2.42)$$

Таким образом, вопрос о критическом расстоянии между электродами, в частности, о критическом отношении R/r в случае коакциальных цилиндров, тесно связан с условиями возникновения и распространения стримеров при начальных стадиях развития коронного разряда. Выражение (2.42) остается предельным и дает минимальную величину критического отношения $R/r_0 = e = 2,718\dots$ [78].

Между тем, большинство разработанных озонатором типа ОКР имеют межэлектродные расстояния порядка 5–10 мм, тогда как радиусы кривизны коронирующих электродов лежат в пределах 25 – 50 микрон. Установлено экспериментально, что выбранные параметры разрядного промежутка являются наиболее оптимальными по части равномерной продувки воздухом разрядного промежутка и при этом значения напряжения питания и разрядного тока недостаточны для возникновения пробойных процессов.

2 Следующим путем усиления разрядного тока может служить, нагрев коронирующего электрода или нагрев воздуха, окружающего разрядный промежуток. В этом случае, с повышением температуры воздуха растет интенсивность ионизации в коронирующем слое из-за увеличения длины свободного пробега электронов, причем значительно возрастает плотность тока во внешней области короны. Установлено, что при нагреве воздуха до 140 °С и при одном том же значений напряжения питания разрядный ток возрастает в пятикратном размере, но применение этого способа для усиления разрядного тока связано с рядом трудностями технического характера: необходимость дополнительного приспособления для нагрева воздуха и затем, продувки его через озонирующий элемент, а также возникает необходимость тепловой изоляции озонирующего элемента от окружающей среды. Кроме того, при такой температуре воздуха (140 °С) наиболее вероятным является разложение озона, полученного в озонирующем элементе.

3 Другим путем для повышения производительности озонирующего элемента является применение вместо воздуха чистого кислорода. Действительно, в этом случае выход озона увеличивается почти, 2 раза [79]. Причиной, задерживающей этого способа, является его дороговизна. Кроме того, в производственных условиях применение кислорода также не удовлетворяет требованиям техники безопасности.

4 К одному из эффективных путей снижения удельных энергозатрат при получении озона относится работа озонирующего элемента при пониженных давлениях воздуха. При этом, единственной возможностью осуществления этого способа является отсасывание воздуха из рабочего объема озонирующего элемента, что в свою очередь предполагает прохождение озонированного воздуха через отсасывающее устройство и в конечном итоге, в значительной степени снижается эффективность получения озона. Это задача была решена [80] с помощью естественного электрического ветра понижающего давление вокруг коронирующего элемента, только такое решение применим для обработки воздуха. Также маломощность

озонирующего элемента легко устранить применением многоэлектродной системы.

Первоначально, для установления полной картины влияния давления воздуха на электрические характеристики отрицательного коронного разряда рассмотрим коаксиальную систему электродов, что существенно упрощает описание процесса из-за наличия известных формул и экспериментальных материалов для данной формы электродов [45].

Результаты исследования показали, что во всем диапазоне температур и давлений воздуха характеристики коронного разряда являются функциями только плотности воздуха. Влияние температуры воздуха на коронный разряд описывается той же закономерностью, что и зависимость плотности воздуха от его температуры. Давление воздуха или плотность его на величину силы тока разряда влияет через начальную напряженность поля коронного разряда, которая в свою очередь, определяет напряжение возникновения разряда в данном промежутке [81].

На основании многочисленных измерений начального напряжения коронного разряда Пику удалось дать эмпирическую формулу для начальной напряженности поля короны, возникающей на поверхности коронирующего провода с радиусом r_0 [62]. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает [82], что в целом наилучшая сходимость (и для коаксиальных цилиндров) получается для следующей формулы Пика:

$$E_0 = 30,3\delta \left(1 + \frac{0,298}{\sqrt{r_0\delta}} \right), \quad (2.43)$$

где δ – относительная плотность воздуха, которая определяется формулой:

$$\delta = \frac{0,386\rho}{273+T}, \quad (2.44)$$

где ρ – барометрическое давление, мм рт.ст., T – температура воздуха, °C; $\delta = 1$ при атмосферных условиях, принятых за нормальные ($\rho = 760$ мм рт.ст., $T = 20$ °C).

Влияние E_0 на величину тока коронного разряда можно определить через начальное напряжение U_0 (2.41) по вольт-амперной характеристике коронного разряда, для примера приведем формулу Таунсенда [43].

$$I = \frac{8\pi\epsilon_0 K(U-U_0)U}{R^2 \ln \frac{R}{r_0}}, \quad (2.45)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость, K – подвижность ионов, U – напряжение между электродами, U_0 – начальное напряжение коронного разряда.

Целесообразно проверить соответствие экспериментальных значений напряжения зажигания коронного разряда с расчетными по формуле Пика (2.43). В таблице 2.2 представлены экспериментальные результаты измерений и расчетные значения начальных напряжений U_0 , U_p и на напряженностей поля короны E_0 , E_p в зависимости от давления и температуры атмосферного воздуха. Все измерения и расчеты относятся к отрицательному коронному разряду.

Таблица 2.2 – Начальные напряжения и напряженности поля короны (атм. воздух R=0,5 см, r₀=0,0025 см).

P, мм рт.ст.	T, °C	Δ	U ₀ , В	E ₀ , кВ/см	E _p , кВ/см формула (2.43)	U _p , В формула (2.41)
100	24,5	0,133	1000	75,5	72,5	955
280	24,5	0,266	1400	105	107	1420
300	24,5	0,399	1750	132	132,3	1755
400	24,5	0,532	2050	155	156	2065
500	24,5	0,665	2300	173	176	2330
680	24,5	0,903	2700	204	209	2770
680	40,0	0,852	2520	190	203	2690
680	60,0	0,801	2460	185	196	2600
680	80,0	0,755	2400	181	189	2510
680	100	0,715	2350	177	183	2423
680	120	0,678	2260	170	178	2360
680	140	0,648	2200	166	173	2290

Значения δ, приведенные в таблице рассчитывались по формуле (2.44). Используя экспериментальные значения U₀ можно вычислить по формуле (2.41) напряженность на поверхности коронирующего провода. Тогда как значения U₀ измеряются достаточно с высокой точностью (0,1%), при определении E₀ по формуле (2.41) может вноситься большая погрешность из-за неравномерности диаметра коронирующего провода по длине.

Из анализа данных таблицы следует, что в большинстве случаев значения E_p больше чем значения E₀. Различие E₀ и E_p не зависит от ρ и T и составляет в среднем 3%, тогда как значения E₀ может меняться относительно E_p при повышении температуры воздуха, достигая иногда до 7%.

Рассмотрим электрические характеристики озонирующего элемента в виде «игла-плоскость (сетка)», который является основным элементом при разработке озонатора на коронном разряде.

Применение для получения озона озонирующих элементов с конфигурацией электродов в виде «игла-плоскость (сетка)» имеет ряд преимуществ. Во-первых, благодаря малым радиусам кривизны концов игл получают низкие начальные напряжения коронного разряда, что, соответственно, ведет к повышению удельного энергетического выхода озона. Во-вторых, в этом случае обеспечивается однонаправленность потока ионов.

Условие самостоятельности разряда может быть записано в упрощенном виде:

$$\int_{r_3}^{r_k} \alpha_{эф} dr = K1, \quad (2.46)$$

где α_{эф} - эффективный коэффициент ударной ионизации электронами; K1 – обобщенный коэффициент, характеризующий условия появления вторичных электронов. Интегрирование по формуле (2.46) производится вдоль силовой линии поля от поверхности коронирующего электрода до точки r_k [60].

Разработаны и успешно применяются несколько эффективных методов расчета электрических полей. Они должны быть рассмотрены с точки зрения их использования для расчета поля коронного разряда. Расчет электростатического поля также является составной частью метода Дейча-Попкова [45].

Особенностью коронного разряда в системах с игольчатыми коронирующими электродами является изменение начальной напряженности вдоль поверхности электрода в соответствии с изменением радиусов кривизны поверхности. Это приводит к тому, что с ростом напряжения зона коронирования, вначале ограниченная кончиком иглы, далее распространяется по поверхности. При этом, условия возникновения коронного разряда на периферии при наличии его в области минимального радиуса кривизны поверхности электрода отличаются от условий первоначального возникновения.

При расчете параметров поля во внешней области униполярного коронного разряда используются следующие допущения, существенно упрощающие задачу:

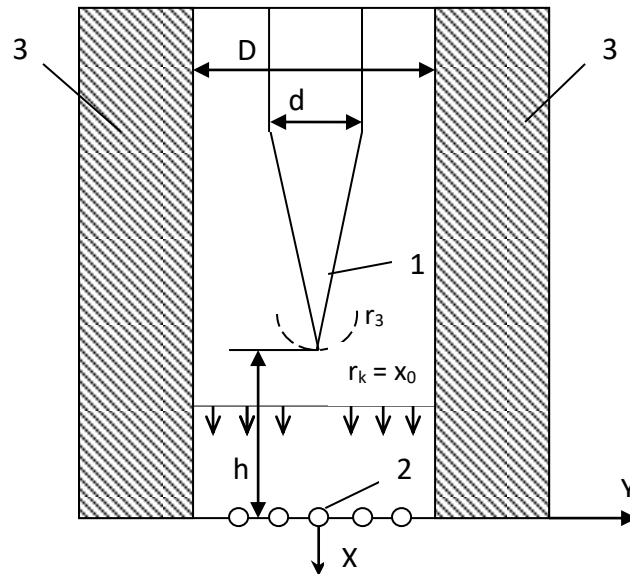
- 1) предполагают, что структура «чехла» коронного разряда в пространстве и во времени однородна;
- 2) размерами «чехла» коронного разряда пренебрегают;
- 3) предполагается, что напряженность у поверхности коронирующего электрода поддерживается на уровне начальной напряженности E_0 независимо от интенсивности коронного разряда;
- 4) при расчетах предполагается, что подвижность ионов (K) является постоянной величиной: $V_i = K \cdot E$, где V_i – скорость движения ионов.

Коронный разряд в коаксиальном цилиндре отличается своей простотой конструкции и удобством расчета его характеристик, но он малоприменим для целей, когда необходимо получать поток свободных ионов, так как большинство ионов убирается внешним электродом. При подвижности ионов порядка (2-3) $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и при среднем градиенте поля во внешней области коронного разряда (2-3) $\text{кВ}/\text{см}$, поток воздуха между электродами, скорость которого обычно не превышает 6 м/с, может увлечь с собой лишь не большую долю полного ионного тока.

Наиболее подходящим моментом для этой цели является коронный разряд между иглой и плоскостью, когда почти все возникшие в коронном разряде ионы увлекаются потоком воздуха. Обычно в качестве электрода – плоскости используют тонкую сетку из нержавеющей металла (нержавеющая сталь, титан и др.), причем основным требованием к сеточному электроду является то, что размеры его ячейки должны быть намного меньше расстояния до коронирующей иглы.

На рисунке 2.4 схематически показана система электродов в виде «игла-сетка» и разрез озонирующего элемента, который был использован в устройстве озонной обработки жидкости, причем из принципа наглядности масштабы размеров не соблюдены. Между тем, в функциональную схему

озонирующего элемента внесены общие обозначения размеров входящих деталей, необходимые в дальнейшем для расчета озонирующего элемента.



1 – коронирующий электрод, 2 – плоская сетка, 3 – корпус озонирующего элемента, D – диаметр корпуса, d – диаметр коронирующего электрода, r_3 – радиус закругления иглы, $r_k = x_0$ – расстояние до кончика иглы, где $\alpha_{эф} = 0$, h – расстояние от кончика иглы до плоскости сетки

Рисунок 2.4 – Функциональная схема озонирующего элемента.

2.2 Исследование характеристик озонирующего элемента при пониженных давлениях воздуха и разработка озонатора

Установлено [45], что уменьшение плотности воздуха, в первую очередь, ведет к снижению значения начального напряжения коронного разряда, причем крутизна вольтамперных характеристик при этом заметно усиливается.

Рассмотрим выходные параметры озонирующего элемента при пониженных давлениях воздуха, к которым относятся производительность по озону (г/ч) и удельные энергетические затраты (г/кВт.ч). Для этого воспользуемся характеристикой озонирующего элемента, полученной в работе [45, с. 169, рис. 57] и аппроксимируя ее находим формулу для зависимости выхода озона от тока коронного разряда:

$$P_{\text{п}} = KI, \quad (2.47)$$

где $P_{\text{п}}$ – производительность по озону (г/ч),

K – коэффициент пропорциональности (г/ч·мА),

I – ток разряда (мА). По величине угла наклона характеристики можно найти значение коэффициента пропорциональности $K = 0,2$ г/ч·мА.

Удельные энергетические затраты (P_y) определяются отношением производительности по озону ($P_{\text{п}}$) к потребляемой энергии $W = U \cdot I$ кВт в час, то есть:

$$P_y = \frac{P_{\text{п}}}{W} = \frac{KI}{UI} = \frac{K}{U} \frac{\text{г}}{\text{кВт}} \cdot \text{ч} \quad (2.48)$$

где U – напряжение между электродами, кВт,

I – ток разряда, А. По сути дела, при определенном токе P_y зависит только от значения U , чем меньше его значение тем выше P_y . Определенный интерес представляет сравнение экспериментальных значений $R_{ПЭ}$ с расчетными $R_{ПА}$ по формуле (2.47). Для наглядности этого сравнения составим таблицу, которая также охватывает экспериментальные значения $R_{УЭ}$.

Таблица 2.3. Производительности по озону и энергетические выхода озонирующего элемента.

U , кВ	5	5,6	6,1	6,4	6,6
I , мА	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
$R_{ПЭ}$, г/ч	0,09	0,25	0,36	0,45	0,5
$R_{ПА}$, г/ч	0,13	0,24	0,33	0,44	0,53
$R_{УЭ}$, г/ кВт·ч	45	40	35	32	29

Как следует из данных таблицы 2.3 максимальное отличие $R_{ПЭ}$ и $R_{ПА}$ не превышает 8%, и поэтому определение $R_{П}$ для других значений разрядного тока по формуле (2.47) приводит к небольшой погрешности измерения. Для определения P_y может быть использована расчетная формула (2.48).

На рисунке 2.5 приведены зависимости напряжений (U) от давления воздуха (P) для различных постоянных значений тока разряда (I), измеренных при давлениях, начиная от 100 мм рт. ст. вплоть до давления 680 мм рт. ст., считая температуру воздуха нормальной 20 °С. Из этих данных следует, что при постоянстве значений I и в случае снижения P оказывается, что на сколько снижается величина U , на столько повышается P_y .

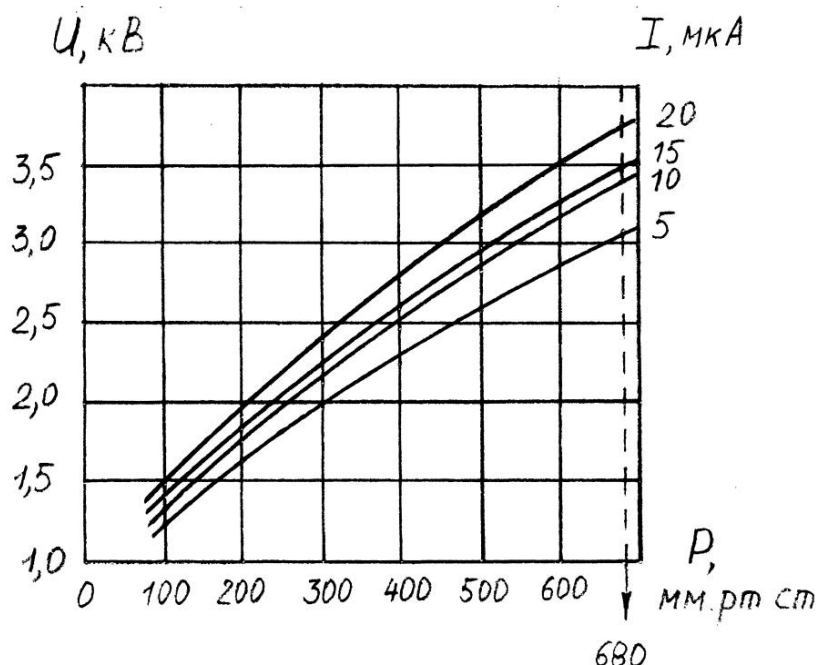


Рисунок 2.5 – Зависимость напряжений от давления воздуха

В соответствии с законами состояний идеального газа снижение давления воздуха также уменьшает концентрацию молекул кислорода в воздухе, что может привести к снижению образования озона в разрядном промежутке. Между тем, снижение P приводит также к обратному эффекту: усилению

ионизационных процессов из-за удлинения длины свободного пробега электронов и поэтому, повышению их энергии. Таким образом, снижение P не может существенно оказать влияние на степень выхода озона, так как при снижении P постоянство значений разрядного тока обеспечивается необходимой плотностью потока зарядов, состоящих, в основном, из ионов кислорода и озона.

В таблице 2.4 приведены производительности по озону ($P_{\text{ПА}}$) и удельные энергетические затраты ($P_{\text{У}}$), рассчитанные по формулам (2.47-2.48), а также соответствующие значения U и I для трех давлений воздуха.

Таблица 2.4 – Выходные параметры озонирующего элемента при пониженных давлениях воздуха.

P , мм.рт.ст.	100				400				680			
I , мкА	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
U , кВ	1,2	1,3	1,4	1,5	2,3	2,5	2,6	2,8	3,1	3,4	3,5	3,8
$P_{\text{ПА}}$, г/ч	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
$P_{\text{У}}$, г/кВт·ч	166	153	142	133	87	80	77	71	64	58	57	52

Как следует из данных таблицы 2.4 при пониженных давлениях воздуха можно получить довольно высокие значения удельных энергозатрат (166 г/кВт·ч), что является основным преимуществом этого способа получения озона.

Одним из путей для достижения пониженного давления воздуха в зоне коронного разряда является применение принципа работы ионно-конвекционного, насоса с электродной системой «игла-плоскость». В этом случае, при прохождении электрического тока в насосе возникает перепад давления в жидкости или газе, перегоняемых через него [66]. Для определения его необходимо проинтегрировать уравнение движения (2.45), подставив туда значения ρ_i и E :

$$P_1 = \frac{j_1}{K}L + \frac{\varepsilon V^2}{2K^2} - \frac{\varepsilon V}{K} \sqrt{\left(\frac{V^2}{4K^2} + \frac{j_1}{\varepsilon K}\right)} - \xi \frac{\delta V^2}{2}. \quad (2.49)$$

Используя выражение для вольт-амперной и напорный характеристик насоса, можно записать выражения для электрической и гидравлической мощностей и эффективности преобразования энергии. Полезная гидравлическая мощность, давления насосом на 1 м² площади канала, в одномерном случае выразится так:

$$N_{\text{П}} = P_1 V = \frac{j_1 V}{K}L + \frac{\varepsilon V^3}{2K^2} - \frac{\varepsilon V^2}{K} \sqrt{\left(\frac{V^2}{4K^2} + \frac{j_1 L}{\varepsilon K}\right)} - \xi \frac{\delta V^3}{2}, \quad (2.50)$$

а затраченная электрическая мощность будет равна:

$$N_{\text{зат}} = j_1 U_0 = j_1 L \sqrt{\left(\frac{V^2}{4K^2} + \frac{j_1 L}{\varepsilon K}\right) - \frac{V}{2K} L}. \quad (2.51)$$

КПД насоса запишется как отношение полезной мощности к затраченной $\eta = \frac{N_{\text{П}}}{N_{\text{зат}}}$. можно показать, что к.п.д. насоса стремится к 1.0 при $K \rightarrow 0$ и $\xi = 0$.

Выражения (2.49-2.51) в основном определяют характеристику ионно-конвекционного насоса при работе на некоторую сеть. Можно решить задачу оптимизации сопротивления сети, в результате которой могут быть получены характеристики насоса при работе с максимальной полезной мощностью. Здесь рассмотрим такое решение для одномерного случая. Для удобства дальнейших преобразований выразим величину плотности тока в явном виде:

$$j_1 = \frac{U_0^2 \varepsilon \varepsilon K}{L^3} + \frac{U_0 V \varepsilon}{L^2}, \quad (2.52)$$

поставив это значение j_1 в уравнение (2.50) получим выражение для полезной гидравлической мощности в зависимости от приложенного напряжения:

$$N_n = \frac{U_0^2 \varepsilon V}{L^2} - \xi \frac{\delta V^2}{2}, \quad (2.53)$$

Затраченная электрическая мощность зависит от приложенного напряжения следующим образом:

$$N_{\text{зат}} = \frac{U_0^3 \varepsilon K}{L^3} + \frac{U_0^2 V \varepsilon}{L^2}, \quad (2.54)$$

Определим скорость потока при оптимальном сопротивлении сети:

$$\frac{\partial N_{\text{П}}}{\partial V} = \frac{U_0^2 \varepsilon}{L^2} - \frac{3}{2} \xi \delta V^2 = 0, \quad (2.55)$$

откуда получим:

$$V_{\text{opt}} = \frac{U_0}{L} \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon}{\xi}}, \quad (2.56)$$

Поставив значение V_{opt} в уравнения (19) и (20), получим соответственно:

$$N_n = \frac{U_0^3 \varepsilon}{L^3} \sqrt{\frac{2\varepsilon}{3\xi\rho}} - \xi \frac{\delta U_0^3}{2L^3} \left(\sqrt{\frac{2\varepsilon}{3\xi\rho}} \right)^3, \quad (2.57)$$

$$N_{\text{зат}} = \frac{U_0^3 \varepsilon K}{L^3} + \frac{U_0^2 \varepsilon}{L^3} \sqrt{\frac{2\varepsilon}{3\xi\delta}}, \quad (2.58)$$

Нами был предложен способ повышения эффективности работы озонаторов и который может быть использован в промышленности для озонной обработки атмосферного воздуха в производственных помещениях.

На сегодняшний день известен способ усиления электрического тока озонатора, заключающегося в том, что создают колебательный контур из параллельно включенных индуктивно-емкостной цепи и озонатора и, регулируя частоту вынужденного колебания, устанавливают резонансную частоту колебательного контура, достигая при этом максимального тока в контуре [83].

Основным недостатком этого способа является необходимость наличия генератора напряжения с регулируемой частотой. Если учесть, что величина выходного напряжения генератора должна быть достаточно большая для поддержания электрического разряда в озонаторе, то разработка и изготовление этого генератора представляют сами по себе сложной задачей.

Наиболее близким по технической сущности является способ для повышения эффективности работы озонатора, который включает возбуждение коронного разряда между коронирующей иглой и внешним электродом при пониженном давлении кислород содержащего газа [83]. Главным недостатком этого способа является то, что устройство, осуществляющее этот способ, не позволяет применения его для озонирования атмосферного воздуха в производственных помещениях. Так как, в этом случае, процессы образования озона и взаимодействия его с обрабатываемой средой объединены и протекают одновременно в рабочей зоне водоструйного насоса. Водоструйный насос обеспечивает отсасывание воздуха из свободного пространства насоса, что ведет к усилению электрического тока с коронирующей иглы при пониженном давлении воздуха.

Разработан способ усиления электрического тока в озонаторе, обеспечивающего высокую эффективность выхода озона при малых удельных энергозатратах [84]. При этом основным достигаемым техническим результатом будет применение свойств электрического ветра, возникающего в условиях коронного разряда, что позволяет упростить конструкцию озонатора и получить малые удельные энергозатраты на 1г. озона.

Как известно, удельные энергозатраты озонирующего элемента определяются количеством выработанного озона на единицу затрачиваемой электроэнергии (г/кВт·ч). В связи с чем, возникает необходимость уменьшения значений питающего напряжения при постоянстве величины тока разряда, так как величина тока в первую очередь определяет количество вырабатываемого озона. Было установлено, что величина напряжения питания, при постоянстве значения силы тока коронного разряда, уменьшается при снижении давления воздуха в разрядном промежутке [83].

Для этой цели возможен способ откачки объема, куда помещен озонирующий элемент. Но, в связи с необходимостью вывода озона из этого объема, едва ли этот метод пригоден для практических применений.

Так же был предложен способ снижения давления воздуха в области разряда, который основан на использовании свойств электрического ветра, возникающегося в условиях коронного разряда. В этом случае, электрический ветер создает скоростной напор потока воздуха (до 5 м/с) в рабочей зоне и заставляет работать разрядный промежуток в режиме ионно-конвекционного насоса [84].

Во внешней области коронного разряда находится объемный заряд, движущийся от коронирующего к внешнему электроду. Ионы, сталкиваясь с молекулами воздуха, передают им некоторую энергию. В результате нейтральные молекулы воздуха приходят в движение, образуя течение среды,

известное под названием электрический ветер. Наибольший интерес представляет система электронов в виде игла - плоскость, так как в этом случае следует ожидать наибольших значений скорости ветра. Результаты измерения скорости ветра в системе электродов игла - плоскость показывают, что средняя скорость движения среды на оси струи постоянна и зависит только от величины тока коронного разряда [72].

В основе действия ионно-конвекционного насоса также лежит использование коронного разряда, возникающего, между коронирующей иглой, к которой подведено высокое напряжение, и противоположно заземленным электродом, отделенным от иглы изолятором. Ионизация происходит в узком коронирующем слое около острия иглы, а образовавшиеся носители осуществляют передачу импульса нейтральным молекулам воздуха во внешней области коронного разряда. Достигнув заземленного электрода, ионы рекомбинируют, а поток воздуха, проходя через отверстия в электроде осуществляет принцип ионно-конвекционного насоса [66].

Применение принципа ионно-конвекционного насоса для системы электродов игла – плоскость может привести к некоторому снижению давления воздуха в разрядном промежутке, что может быть более существенным в случае, если поместить его в полузакрытую камеру. Теоретическое описание работы насоса сводится к расчету внешней области коронного разряда непосредственно создающей перепад давления.

Выражение для определения перепада давлений, возникающей в насосе при прохождении разрядного тока получается достаточно громоздким и неудобным для практического применения. Это выражение существенно упрощается, если брать сферически симметричный случай при скорости потока $V = 0$, тогда перепад давлений будет равен:

$$\Delta P \cong \frac{j_1 r_1^2}{k} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} \right);$$

где r_0 - радиус коронирующего острия; r_1 - расстояние до заземленного электрода; j_1 - плотность тока в сечении r_1 ; k – подвижность ионов.

На рисунке 2.6 представлена функциональная схема работы способа усиления электрического тока в озонирующем элементе, состоящей из электродной системы игла-сетка. Устройство содержит коронирующий электрод 1 в виде иглы и внешний электрод 2 в виде сетки, расположенные в трубе 3 с заглушкой 4, выполненные из озоностойкого изоляционного материала (фторопласт, винипласт и т. д.). Кроме того, показаны направления ионов 5 и пристеночного потока воздуха 6, поступающего в камеру извне. К коронирующему электроду через микроамперметр (мкА) подведено питающее напряжение (-U), а сеточный электрод 2 заземлен.

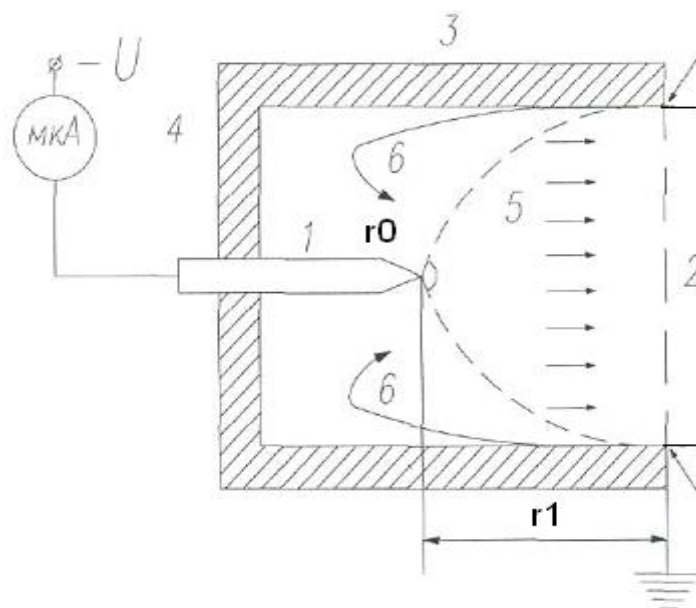


Рисунок 2.6 – Функциональная схема работы способа усиления электрического тока в озонирующем элементе, состоящей из электродной системы игла-сетка.

Устройство работает следующим образом. После подачи напряжения ($-U$), достаточной величины на коронирующий электрод 1, между ним и сеточным электродом 2 возникает и протекает коронный разряд, причем образованный при этом отрицательный объемный заряд охватывает пространство 5, очерченное штриховыми линиями и показанное на рисунке. С течением некоторого времени (не более 5с) устанавливается устойчивый электрический ветер, направленный в открытую часть разрядной камеры и устройство начинает работать в режиме ионно-конвекционного насоса. При этом наблюдается постепенное снижение давления воздуха внутри разрядной камеры и, как и следовало ожидать, увеличивается сила разрядного тока. Такое положение не может, продолжаться долго, так как в определенный момент начинаются процессы засасывания наружного воздуха через промежуточную область разрядной камеры 6. Через некоторое время устанавливается стабильный режим пониженного давления воздуха внутри разрядной камеры, что означает превалирование процесса отсоса воздуха над процессом поступления внешнего воздуха в камеру [84].

Устройство имеет следующие параметры: радиус закругления иглы $r_0 = 0,2\text{мм}$, диаметр изоляционной трубы 16мм , расстояние от кончика иглы до сетки равнялось $r_1 = 6\text{мм}$, а напряжение питания U разрядной камеры менялось в диапазоне от 4 до 14 кВ. При включении напряжения источника питания порядка 10 кВ первоначально средний ток разрядной камеры равнялся 8мкА. Затем, при установлении устойчивого режима электрического ветра в открытой части разрядной камеры, ток постепенно растет, доходя до 10мкА. Для определения удельных энергозатрат предлагаемого устройства (г/кВт·ч) в том или в другом случае, воспользуемся градировочной кривой снятой озонметром типа ЛЭК разработки Санкт-Петербургского технического

университета для озонирующего элемента на коронном разряде. При этом удельная производительность озонирующего элемента составила в среднем 0,2г озона в час при силе тока разряда 1 мА. Исходя из этого, рассчитаем удельные энергетические выходы предлагаемого устройства при различных режимах его работы. При этом удельный энергетический выход устройства при атмосферном давлении воздуха 680 мм рт.ст. (г. Алматы) и в начальный момент равен 20г/кВт·ч, тогда как при устойчивом режиме электрического ветра он равнялся – 23,5г/кВт·ч. Во втором режиме для поддержания первоначального тока разряда 8 мкА, необходимо уменьшить напряжение источника питания до 8,5кВ, что в конечном итоге ведет к уменьшению удельных энергозатрат на выработку озона в коронном разряде.

Сравнение значения снижения напряжения источника питания при постоянстве силы тока разряда с известной зависимостью напряжения коронного разряда от давления атмосферного воздуха [31] позволяет ориентировочно определить давление воздуха в области разряда, например, в нашем случае, снижение давления воздуха относительно атмосферного (680 мм рт.ст.) составило порядка 100 мм рт.ст.

Разработанный озонатор для озонирования атмосферного воздуха и может быть использован для озонподготовки производственных, служебных и бытовых помещений.

До этого было предложено устройство для получения озона в зоне коронного разряда, содержащее коронирующий электрод в виде иглы и внешний электрод в виде сетки, расположенные в трубе с заглушкой, выполненные из озоностойкого изоляционного материала (фторопласт, винипласт и т.д.) [84]. Однако предложенное устройство из-за применения одной коронирующей иглы не обеспечивает достаточную энергоёмкость коронного разряда и производительность по выходу озона. Кроме того, ввиду полной открытости с одной стороны разрядной камеры, эффект понижения давления в зоне разряда из-за электрического ветра намного ослаблен и поэтому, не в полной мере соблюдается режим ионно-конвекционного насоса.

Наиболее близким по технической сущности к данной разработке является озонатор, содержащий последовательно расположенные озонирующие элементы, выполненные в виде “коронирующая игла – плоская металлическая сетка”, которые помещены в полужакрытую камеру и расположены осесимметрично в направлении электрического ветра, возникающего в сторону открытой части камеры и снабжен схемой для поочередного включения озонирующих элементов [84]. Следует отметить, что данный озонатор имея несколько последовательно расположенных озонирующих элементов, несомненно имеет по сравнению с предыдущим устройством более высокую эффективность образования озона при малых энергозатратах. Между тем, в предложенном озонаторе процессы образования озона и электрического ветра совмещены, и поэтому, озон, образованный в начале разрядной камеры, проходя через несколько озонирующих элементов, в большей части теряются.

В связи с этим, ожидаемый эффект от последовательно расположенных озонирующих элементов, значительно ослаблен.

Перед нами стояла задача разработки озонатора, обеспечивающего высокую эффективность выхода озона при малых удельных энергозатратах. При этом основным достигаемым техническим результатом будет применение свойств электрического ветра, возникающего в условиях коронного разряда, что позволяет упростить конструкцию озонатора и получить малые удельные энергозатраты на 1 г. озона.

Это достигается тем, что в озонаторе, содержащем последовательно расположенные озонирующие элементы, выполненные в виде “Коронирующая игла – плоская металлическая сетка”, которые помещены в полузакрытую камеру и расположены осесимметрично в направлении электрического ветра, возникающего в сторону открытой части камеры, согласно изобретению, озонатор содержит озонирующие элементы, расположенные вблизи закрытой части камеры озонатора и дополнительно коронирующие электроды, расположенные вблизи открытой части камеры по краю круга сечения узкой части патрубка.

Как было отмечено, в предложенной конструкции озонатора, применяется принцип работы ионно-конвекционного насоса с учетом известных параметров электрического ветра в коронном разряде, что, в целом приводит к снижению давления в разрядном промежутке [44]. Установлено, что снижение давления в зоне разряда позволяет поднять эффективность работы озонатора. Кроме того, следует ожидать, что эффект снижения давления в межэлектродном пространстве будет более ощутим, если разрядную систему поместить в полузакрытой камере таким образом, чтобы возникший электрический ветер был направлен в сторону открытой части камеры. В случае последовательного включения нескольких озонирующих элементов в разрядной камере, расположенных осесимметрично, эффект снижения давления в камере должен быть более значителен по сравнению с одной коронирующей иглой. При этом общий перепад давления определяется суммой $\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \dots$ и т.д., и поэтому величины разрядных токов озонирующих элементах при одних и тех же разностях потенциалов имеют тенденцию к увеличению.

Между тем, в предложенном озонаторе, при возможности существенного снижения давления в камере и увеличения разрядного тока, фактическое количество озона, вырабатываемое в озонаторе намного снижено чем ожидаемое. Это связано, что и является основным недостатком предложенного озонатора, с совмещением в озонаторе процессов образования озона и создания электрического ветра теми же коронирующими электродами. При этом, образованный озон в начале камеры озонатора проходя многократно через разрядные промежутки постепенно рекомбинирует и разлагается, что приводит, в конечном итоге, к уменьшению общего количества озона на выходе озонатора.

В связи с этим, был разработан новая конструкция озонатора, которая позволяет разделить процессы образования озона и создания электрического

ветра, что приводит к обеспечению малой удельной энергозатраты при простой конструкции [85].

На рисунке 2.7 представлена функциональная схема озонатора, работающего в полужакрытом режиме и состоящего из отдельно расположенных озонирующих элементов и коронирующих электродов для создания электрического ветра.

Озонирующие элементы 4 шт. в виде электродной системы “игла-сетка”, содержат коронирующие электроды 1 и внешний электрод 2 в виде сетки, расположенные в закрытой части трубы 3, выполненные из озоностойкого изоляционного материала (фторопласт, винипласт и т.д.). К коронирующим электродом подведено от блока питания (БП) высокое напряжение отрицательной полярности, а сеточный электрод 2 заземлен. Для создания электрического ветра в камере озонатора используются дополнительно коронирующие электроды 4, прикрепленные к сеточному электроду 2 и расположенные вблизи открытой части камеры по краю круга сечения узкой части патрубка 5 (сечение АА).

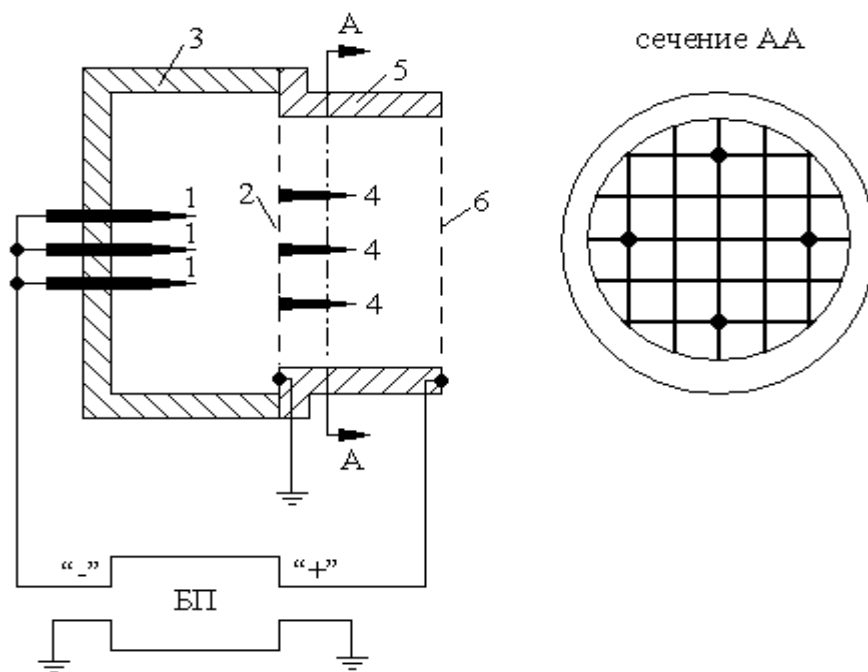


Рисунок 2.7 – Функциональная схема озонатора, работающего в полужакрытом режиме и состоящего из отдельно расположенных озонирующих элементов и коронирующих электродов для создания электрического ветра

Для них вторым электродом служит сетка 6, которая закреплена к открытой части патрубка и присоединена к положительному полюсу источника питания.

После подачи напряжения ($-U$), достаточной величины на коронирующие электроды, между ними и сеточным электродом 2 возникает и протекает коронный разряд, причем образованный при этом отрицательный объемный заряд, состоящий в основном из ионов кислорода и озона, стремится к

сеточному электроду 2 под нулевым потенциалом, где частично нейтрализуется, образуя молекулы кислорода и озона, а большая часть ионов ускоряются в сторону электрода 6 с положительным потенциалом. С течением некоторого времени (не более 5с) устанавливается устойчивый электрический ветер, направленный в открытую часть разрядной камеры и озонатор начинает работать в режиме ионно-конвекционного насоса. При этом наблюдается постепенное снижение давления воздуха внутри разрядной камеры и, как и следовало ожидать, увеличивается сила разрядного тока. Такое положение не может, продолжаться долго, так как в определенный момент начинаются процессы засасывания наружного воздуха через пристеночную область разрядной камеры 5. Для предотвращения пристеночного засасывания воздуха в камеру, установлены дополнительно коронирующие электроды по краю круга сечения узкой части патрубка 5 (сечение АА). Через некоторое время устанавливается стабильный режим пониженного давления воздуха внутри разрядной камеры, что означает превалирование процесса отсоса воздуха над процессом поступления внешнего воздуха в камеру [85].

Озонирующие элементы (4 шт.) имеют следующие параметры: радиус закругления игл $r_0=0,2\text{мм}$, диаметр изоляционной трубы 16мм, расстояние от кончиков игл до сетки равнялось $r_1=6\text{мм}$, а напряжение питания U разрядной камеры менялось в диапазоне от 4 до 14 кВ. При включении напряжения источника питания порядка 10 кВ первоначально средний ток разрядной камеры равнялось 30 мкА. Затем, при установлении устойчивого режима электрического ветра в открытой части разрядной камеры, ток постепенно растет, доходя до 38 мкА. Для определения удельных энергозатрат предлагаемого устройства (г/кВт·ч) в том или в другом случае, воспользуемся градуировочной кривой снятой озонометром типа ЛЭК разработки Санкт-Петербургского технического университета для озонирующего элемента на коронном разряде. При этом удельная производительность озонирующего элемента составила в среднем 0,8 г озона в час при силе тока разряда 4мА. Исходя из этого, рассчитаем удельные энергетические выходы предлагаемого устройства при различных режимах его работы. При этом удельный энергетический выход устройства при атмосферном давлении воздуха 680 мм рт.ст. (г. Алматы) и в начальный момент равен 20г/кВт·ч, тогда как при устойчивом режиме электрического ветра он равнялся – 23,5г/кВт·ч. Во втором режиме для поддержания первоначального тока разряда 8 мкА, необходимо уменьшить напряжение источника питания до 8,5кВ, что в конечном итоге ведет к уменьшению удельных энергозатрат на выработку озона в коронном разряде.

Сравнение значения снижения напряжения источника питания при постоянстве силы тока разряда с известной зависимостью напряжения коронного разряда от давления атмосферного воздуха [45] позволяет ориентировочно определить давление воздуха в области разряда, например, в нашем случае, снижение давления воздуха относительно атмосферного (680 мм рт.ст.) составило порядка 100 мм рт.ст

Общим недостатком известных озонаторов является то, что для получения озона в окружающей среде необходимо обеспечить продувку воздуха через них. В этом случае, большинство образованного озона проходит через разрядную зону второй половины озонатора, что приводит к частичной потере озона. Кроме того, из-за применения коронно-барьерного разряда в озонаторах возникает необходимость в качестве диэлектрического барьера использование озоностойких материалов (фторопласт, винипласт, керамика и т.д.), требующих «высокой» технологии изготовления.

В связи с этим была поставлена задача разработки озонирующего элемента на коронно-барьерном разряде при малых межэлектродных расстояниях, который обеспечит малогабаритность его и приводит к значительному снижению величины напряжения питания [86].

Диэлектрический корпус озонирующего элемента выполнен в виде цилиндра с окнами для свободного доступа воздуха и внутри него установлен диэлектрический стержень, соосно расположенный в корпусе, на котором намотана под углом наклона 45° спираль из медной проволоки с эмалевым покрытием (барьер) с просветом между витками не менее диаметра проволоки, коронирующая проволока, расположена сверху этой намотки и выполнена с обратной спиральной намоткой по сравнению с первой намоткой с углом обратного наклона 45° .

В озонирующем элементе процессы возбуждения коронно-барьерного разряда и вследствие, образования озона, протекают преимущественно в просвете между витками медной проволоки, и из-за возможности свободного доступа воздуха в зону разряда образованный озон естественной конвекцией начинает распространяться в окружающую атмосферу. Использование малых межэлектродных расстояний в предлагаемом озонирующем элементе приводит к упрощению конструкции источника питания и к значительному снижению величины питающего напряжения [86].

На рисунке 2.8 представлена функциональная схема озонирующего элемента, работающего на коронно-барьерном разряде, а также показан частичный разрез разрядной камеры.

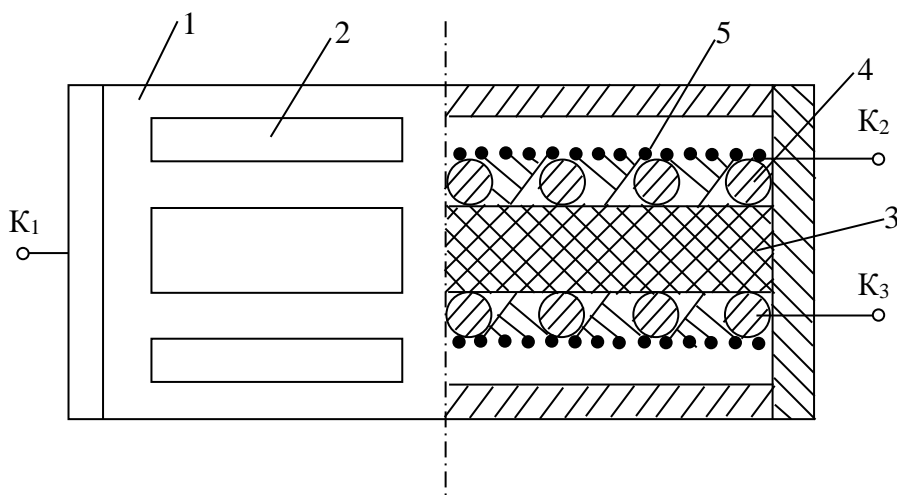


Рисунок 2.8 – Озонирующий элемент

Озонирующий элемент содержит корпус из фторопласта 1 с окнами 2 для свободного доступа воздуха, стержень из фторопласта 3 соосно расположенный в корпусе, катушку из медной проволоки 4, намотанную на стержень 3, коронирующую проволоку из вольфрама или из молибдена в виде спирали 5, расположенную поверх первой намотки 4 и клеммы K_1 , K_2 , K_3 для подсоединения озонирующего элемента с источником питания.

На рисунке 2.9 показана функциональная схема источника питания, которая состоит из двух конденсаторов C_1 , C_2 и из двух высоковольтных диодов D_1 , D_2 подключенных к трансформатору T_p и к катушкам 4 и 5, представленных на рисунке в виде индуктивностей L_1 и L_2 . На фиг.2.12 также показаны в виде клемм K_1 , K_2 , K_3 точки присоединения с озонирующим элементом.

Переменное напряжение достаточной величины подается на клеммы K_2 , K_3 озонирующего элемента, после чего в просветах между витками первой намотки возникает коронно-барьерный разряд, приводящий к образованию озона в атмосферном воздухе. Переменное напряжение для питания озонирующего элемента вырабатывается с помощью повышающего трансформатора T_p со средней точкой во второй обмотке и двумя амплитудными преобразователями (C_1D_1 и C_2D_2), работающими в режиме закрытого входа.

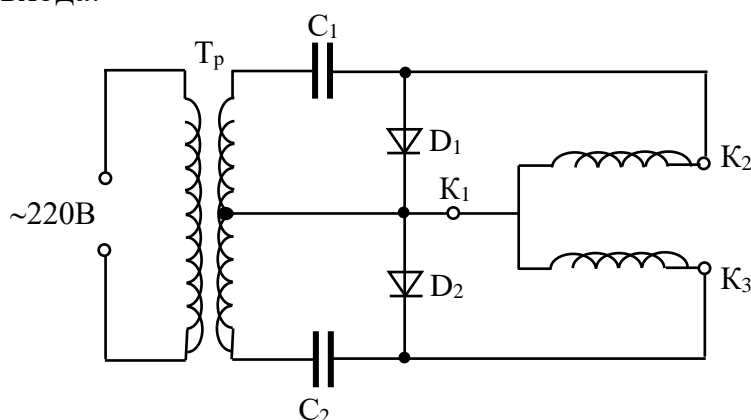


Рисунок 2.9 – Функциональная схема источника питания

Применение трансформатора T_p со средней точкой во вторичной обмотке позволяет для каждой катушки (4,5) отдельно построить два независимых источника питания с общей точкой. Если учесть то, что наиболее эффективно протекают процессы образования озона в отрицательном коронно-барьерном разряде, то возникает необходимость подачи отрицательного потенциала на коронирующую проволоку 5 или медная проволока должна находиться под положительным потенциалом. Амплитудный преобразователь с закрытым входом C_1D_1 преобразует питающее напряжение в форме $U(t) = U_m \sin \omega t$ в пульсирующее напряжение, амплитудное значение которого меняется от 0 до $-2U_m$. Для питания катушки из медной проволоки 4 используется другой преобразователь C_2D_2 , который, наоборот, на выходе выдает пульсирующее напряжение положительной полярности с амплитудой от 0 до $+2U_m$.

Озонирующий элемент имел следующие геометрические размеры: коронирующая проволока из вольфрама с диаметром 100 микрон, расстояние между витками спирали равно 1мм; диаметр медной проволоки 1мм, межвитковое расстояние – 1мм, пробойное напряжение изоляции проволоки из эмали не менее 5 кВ; диэлектрический стержень имел диаметр, равный 10мм, внутренний диаметр корпуса равно 20мм, длина его составила 10см.

При напряжении питания 2,2кВ ток коронно-барьерного разряда составил 1мА, что позволяет определить, в целом, потребляемую мощность данного опытного образца озонирующего элемента, равную 2,2Вт. По градировочной кривой снятой озонатором типа ЛЭК разработки Санкт-Петербургского технического университета для озонирующих элементов на коронном разряде, определим производительность озонирующего элемента по озону равную 0,1г/час, а при этом энергозатраты составили 21г/кВт·ч [86].

2.3 Разработка озонатора с питанием высоковольтных импульсов напряжения для автоматического регулирования концентрации озона

Озон в помещениях пищевой промышленности главным образом используется для стерилизаций и дезинфекции воздуха. Он является сильнейшим окислителем имеет важное свойство, что после его применения не оставляет никаких побочных действий. В большинстве случаев озон получают в специальных аппаратах – генераторах озона путём пропускания предварительно осушенного воздуха через пространство между электродами, на которые подаётся высокое напряжение[51].

Слабое распространение различных технологий с применением озона объясняется довольно высоким уровнем энергозатрат на производство озона. В связи с этим разработка озонатора с оптимизированными параметрами синтеза озона является актуальным на сегодняшний день.

В этом плане, одним из главных критериев работы озонатора является энергетический выход озона, определяющим количество продукта (озон), полученное на единицу затрачиваемой энергии (г/кВт·ч). Именно это величина служит основной отправной точкой для сравнения озонаторов, работающих на различных формах электрического разряда [47].

Еще одним важным критерием, характеризующий озонатор является суммарная производительность его по озону (г/ч), что обычно выбирается из требования объекта или объема обрабатываемого продукта.

Для достижения вышеуказанных целей был разработан озонатор высокочастотных импульсов типа ОВИ-1, который работает в режиме коронно-барьерного разряда [85]. Электрическим барьером служит стекло, толщиной 1 мм, расположенное между коронирующим и внешними электродами озонирующей ячейки озонатора. Для коронно-барьерного разряда озонаторной ячейки используется высоковольтные импульсы длительностью порядка 75 мкс и частотой повторения до 4 кГц [87].

Удельные энергозатраты в импульсном коронном разряде (ИКР) не превышают таковые в барьерном разряде [44]. Установка, на которой были

проведены экспериментальные исследования по наработке озона в ИКР с расширенной зоной ионизации, состоит из сильноточного тиристорного генератора, повышающего импульсного трансформатора с выходным напряжением до 3 кВ. Схема установки приведена на рисунке 2.10.

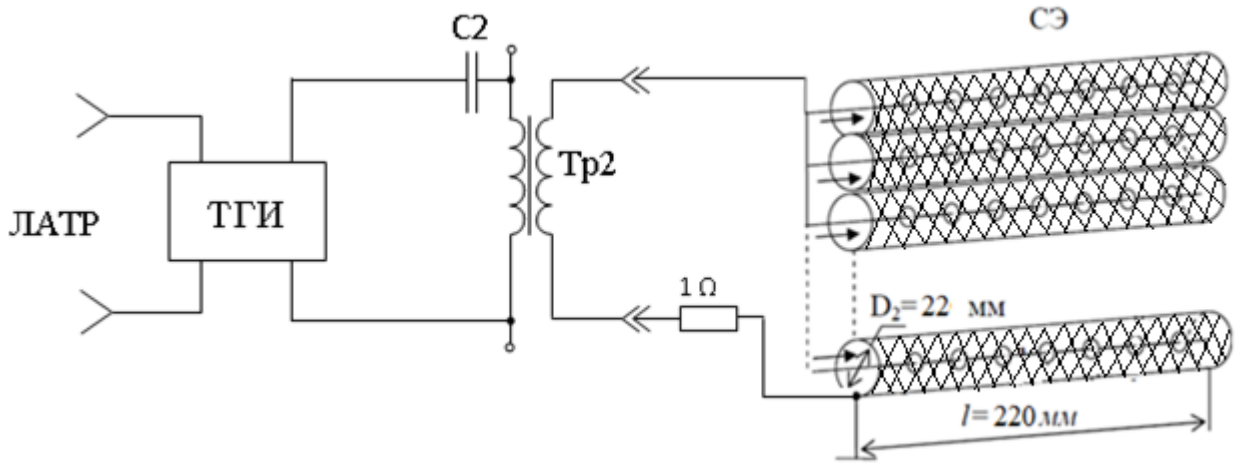
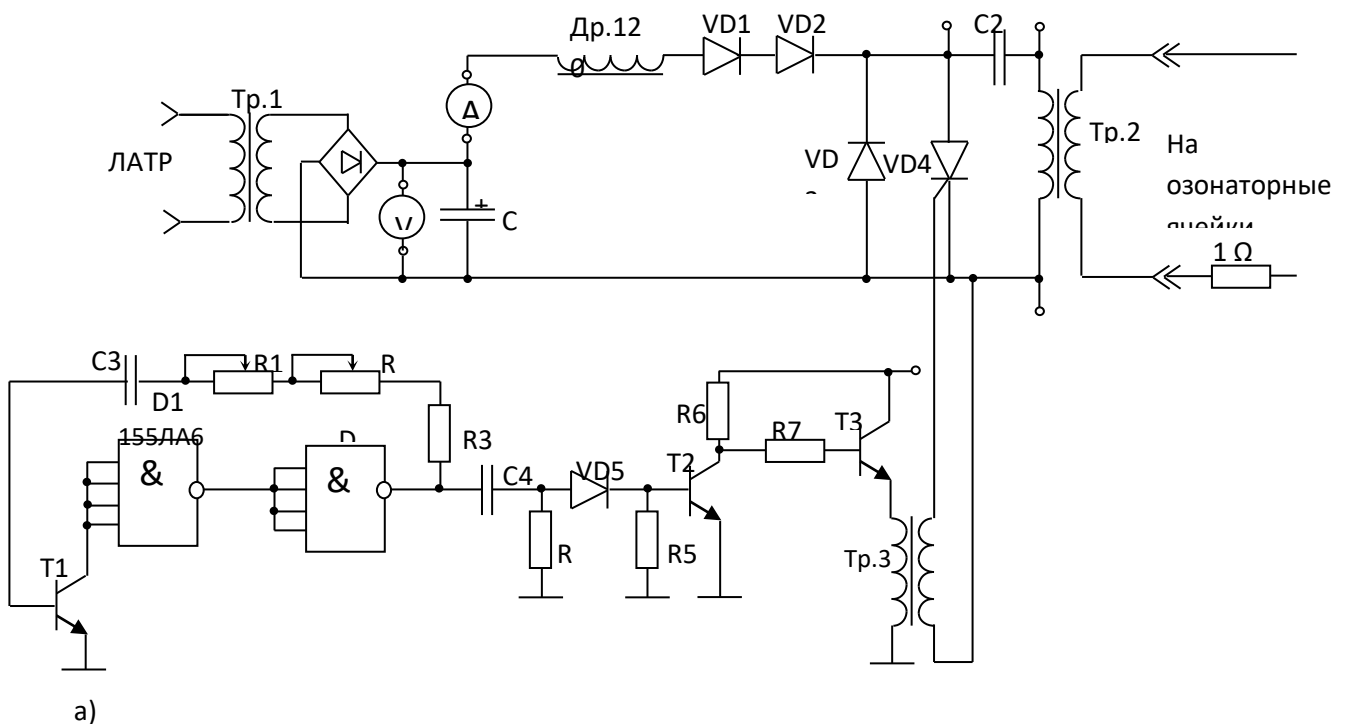


Рисунок 2.10 – Функциональная схема экспериментальной установки: ТГИ – тиристорный генератор импульсов; С2 – накопительный конденсатор; Тр2 – трансформатор; СЭ – электродная система; D_1 – диаметр трубок; l – длина трубок.

Сырой (неосушенный) воздух подавался в электродную систему при помощи компрессора. Для измерения концентраций озона использовался озонметр, установленный на выходе озонаторной ячейки.

Озон генерируется при высоком напряжений. Поэтому нами разработана установка для генерирования высоковольтных импульсов, подаваемых на озонаторные ячейки коронно-барьерного разряда. Принципиальная электрическая схема генератора озона типа ОВИ-1 представлена на рисунке 2.11 [88].



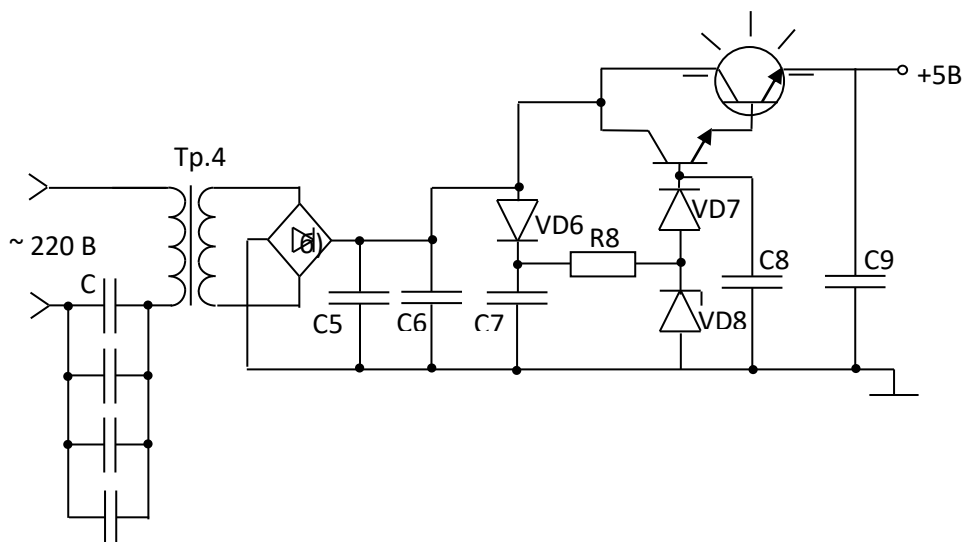


Рисунок 2.11 – Электрическая схема источника высоковольтных импульсов для озонаторной ячейки: а) источник высоковольтных импульсов напряжения (ИВИН), б) высоковольтный источник низковольтного напряжения для ИВИН

Установка работает следующим образом. Блок генерирования высоковольтных импульсов соединен с сетью 220 В через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР). По схеме, напряжение питания снимается с обмотки автотрансформатора ЛАТР и подается на первичную обмотку трансформатора Тр.1. Ток вторичной обмотки выпрямляется диодным мостиком и протекает через дроссель, два последовательно включенных диода VD1 и VD2, накопительный конденсатор С2 емкостью 3мФ, первичную обмотку трансформатора Тр.2 [89].

Озонаторная ячейка состоит из двух электродов и электрического барьера в виде стекла. Один из электродов, на который подается отрицательный потенциал, выполнен в виде металлической сетки с тем, чтобы обеспечить возможность для диффузии озона из разрядного промежутка. Другой электрод, на который подается положительный потенциал, выполнен в виде пластины. При поступлении положительного импульса от трансформатора Тр.3 на управляющий электрод тиристора VD4 происходит открывание тиристора и накопительный конденсатор С2 разряжается через включенный тиристор на первичную обмотку трансформатора Тр.2. При этом на вторичной повышающей обмотке наводится высоковольтный импульс, который подается на озонаторную ячейку барьерного разряда.

Диод VD3 служит для погашения ЭДС самоиндукции первичной обмотки трансформатора Тр.2 при протекании через нее разрядного тока накопительного конденсатора С2.

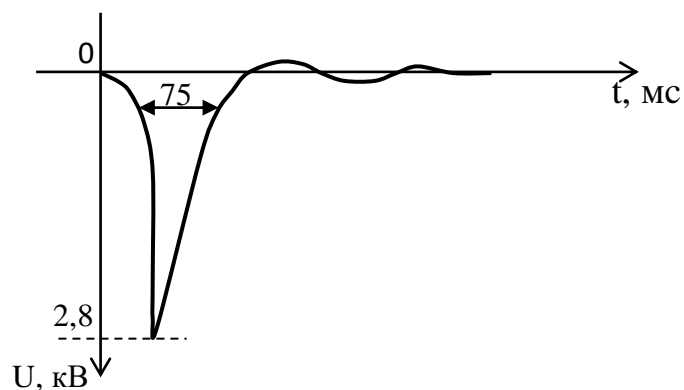


Рисунок 2.12 – Импульсный сигнал генератора озона

В цепи вторичной обмотки последовательно с озонаторной ячейкой включено небольшое сопротивление 1 Ом, которое служит для наблюдения осциллографом формы импульсного тока через ячейку при проведении исследований.

На переднюю панель устройства выведены гнезда для подключения вольтметра и амперметра к выходу выпрямителя, а также гнезда для подключения осциллографа с целью наблюдения формы напряжений на накопительном конденсаторе С3 и на первичной обмотке трансформатора Тр.2 при проведении исследований.

Импульсы, включающие тиристор VD4, вырабатываются схемой импульсного генератора, собранного на цифровой микросхеме 155ЛА6 и транзисторе Т1 [90]. Импульсы генератора усиливаются усилителем на транзисторах Т2 и Т3, и через импульсный трансформатор Тр.3 подаются на включение тиристора ДЗ. Импульсный трансформатор Тр.3 необходим для гальванической развязки цепей питания трансформатора Тр.2 и генератора импульсов. Частота повторения импульсов регулируется переменными резисторами R1 (грубо) и R2 (точно), что необходимо при проведении исследований. Стабилизированный выпрямитель на +5В, служит для питания генератора импульсов и усилителя [89]. В его состав входят: трансформатор Тр.4, мостиковый выпрямитель и схема стабилизатора напряжения.

Для периодического разряда конденсатора С2 через первичную обмотку Тр2 применяется тиристорный импульсный разрядник на КУ202Н [95], на управляющий электрод которого через развязывающий трансформатор Тр3 (применяется высокочастотный малогабаритный трансформатор типа МИТ-4В) и усилитель-формирователь на транзисторах Т2 (n-p-n типа КТ315Г) и Т3 (p-n-p КТ814Б) поступают импульсы с регулируемого мультивибратора–автогенератора на интегральной микросхеме DD1 (К155ЛА6), транзисторе Т1 (типа КТ315И) и RC- цепи, причем $R = R1 + R2$, состоит из двух переменных резисторов.

Изменение частоты в диапазоне «Грубо» происходит вращением движка R1 (330 кОм), а в более узком диапазоне «Точно» – вращением движка R2 (4,7 кОм). Отпирание тиристора происходит за счет импульсов, поступающих с автогенератора, при этом через него происходит разряд конденсатора С2, при этом в конце разряда автоматически попадает первичной обмотке ТР2, при

этом через индуктивность во вторичной обмотке Tr2 вырабатываются импульсы той же частоты, но намного более высокой амплитуды, которые и поступают на озонаторные ячейки.

Диоды VD1, VD2 (типа КД202В) предотвращают попадание разрядных импульсов в цепь выпрямителя – LC-фильтра, а диод VD3 (КД202В) предотвращает пробой тиристора VD4 (КУ202И) от обратного напряжения (ЭДС самоиндукции Tr2).

Вспомогательный источник на Tr4, диодного моста и параметрического стабилизатора на стабилитроне КС168А и транзисторах КТ315 и КТ815 служит для питания ИС автогенератора и усилителя-формирователя [91].

Разработанная установка для озонирования воздуха может использоваться для хранения картофеля и овощей в типовых хранилищах контейнерного типа [92].

2.4 Обоснование режимов озонирования в процессе обработки в производственных помещениях

Как отмечалось выше, озонированный воздух с успехом применяется как средство для стерилизации, обеспечения сохранности пищевых продуктов и для устранения запаха (дезодорация) в холодильниках и овощехранилищах. Озон позволяет хранить в одной камере несовместимые продукты без риска испортить их из-за передачи запахов. Окисляя этилен, озон задерживает перезревание фруктов, уничтожает окись углерода и резко снижает содержание вредных, токсичных, дурно пахнущих веществ в воздухе [39].

Были исследованы вопросы обеззараживания воздуха на предприятиях агропромышленного комплекса с применением автоматического регулирования концентраций озона.

В работе [3] автор, изучая влияние озона на микрофлору продуктов животного происхождения (охлажденного говяжьего мяса и полукопченых колбас), рекомендует следующие условия озонирования:

- для дезинфекции воздуха холодильных камер – концентрация 12-14 мг/м³, время озонирования 10 ч.;

- для хранения говяжьего мяса (температура 0-1°С) – концентрация 10-20 мг/м³, ежедневное озонирование по 4 часа в начальный период хранения в 4 суток; сроки хранения мяса с начальным содержанием 10² – 10³ бактерий/см увеличиваются при этом до 5 суток;

- для хранения полукопченных мяс – концентрация 10-15 мг/м³, ежедневное озонирование по 3 ч. в начальный период хранения в течение 5 суток; сроки хранения при температуре 4 и -2°С составляют 25 и 70 суток соответственно.

Украинский НИИ торговли и общественного питания разработал и опубликовал «Временные методические рекомендации по применению озона для дезинфекции плодоовощехранилищ и хранения картофеля» [28].

Режимы основного периода хранения плодоовощной продукции приведены в таблице 2.5.

Согласно представленного материала дезинфекционные мероприятия плодоовощных хранилищ подразделяются на следующие этапы:

- перед закладкой продукции на хранение хранилища должны быть высушены, убраны, побелены;

- для снижения потерь от микробиологической порчи перед закладкой продукции на длительное хранение необходимо провести дезинфекцию самого хранилища (дезинфекцию хранилищ методом озонирования рекомендуется проводить по следующим режимам: обработка озоном при концентрации 30-35 мг/м.куб. в течение 8 часов или при концентрации озона 50 мг/м.куб – 5 часов.);

- режимы озонирования в процессе хранения картофеля:
 - а) в лечебный период хранения — температура хранения +12 - +18 °С, относительная влажность 80-90%, концентрация озона 25-30 мг/м³, периодичность по 4 часа через 3 суток;

- б) в основной период хранения — температура хранения +2 - +4 °С, относительная влажность 85-95%, концентрация озона 15-20 мг/м³, периодичность по 4 часа через 3-4 суток.

Таблица 2.5 – Режимы основного периода хранения плодоовощной продукции

Продукт	Концентрация озона, мг/м.куб	Время озонирования в сутки, ч	Количество обработок в неделю
Капуста	7-13	4	1
Морковь	5-15	4	3 дня подряд 1 раз в месяц
Чеснок	9-14	5	2
Лук	16-20	3	2 дня подряд 2 раза в месяц
Виноград	3-8	3	3
Салат	9-12	2	4
Яблоки	4-9	5	2

При воздействии озоном на плодоовощную продукцию наблюдается резкое снижение обсемененности на ее поверхности глинистой микрофлорой, снижение уровня метаболических процессов и препятствуется ее прорастание, т.е. устраняются основные причины порчи сельхозпродукции, что дает значительный экономический эффект.

Таким образом, при применении озона в пищевой промышленности большое внимание должно быть обращено на концентрацию выделяемого озона для обработки продукции. Также необходимо учитывать особенности технологического процесса, видовой состав микрофлоры, температуру,

влажность и другие параметры, которые могут оказать влияние на действие озона.

В связи с этим, вопросы разработки устройств для озонирования с автоматизацией контроля и регулирования концентраций озона в помещениях агропромышленного комплекса является актуальным.

2.5 Выводы по разделу

1. Дана качественная картина распределения ионов $O^{\cdot-}$, $O_2^{\cdot-}$, $O_3^{\cdot-}$, O_2^+ и электронов в коронирующем слое отрицательной короны. На основе вольтамперных характеристик получены расчетные значения плотностей ионов озона и кислорода на границе коронирующего слоя. На основе уравнения непрерывности для ионов озона получено выражение для плотности нейтральных молекул озона в разрядной зоне отрицательной короны.

2. Решена система дифференциальных уравнений для коронного разряда с целью моделирования процессов в зоне разряда и определения доли диффузионной составляющей тока коронного разряда.

3. Решена задача по разработке озонатора с применением свойств электрического ветра, возникающего в условиях коронного разряда, что позволило упростить конструкцию озонатора и получить малые удельные энергозатраты на единицу веса вырабатываемого озона.

4. Разработан озонирующий элемент на коронно-барьерном разряде при малых межэлектродных расстояниях, который обеспечит малогабаритность его и приводит к значительному снижению величины напряжения питания.

5. Разработана усовершенствованная конструкция озонатора, работающего в полужакрытом режиме и состоящего из отдельно расположенных озонирующих элементов и коронирующих электродов для создания электрического ветра.

6. Результаты исследований представленных во втором разделе опубликованы нами в [55, 65, 69, 70, 71, 76, 84, 85, 86, 87].

3. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ОЗОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

3.1. Получение адаптивной прогнозирующей модели ТП озонирования

Технологический процесс озонирования – сложная инерционная система, характеризующаяся нестационарностью параметров [60-63]. Нестационарность параметров ТП озонирования при хранении сельскохозяйственной продукции в значительной мере обусловлена нестационарностью свойств исходных продуктов, поставляемых на хранение.

Изменение во времени параметров ТП связано, прежде всего, с различием свойств поступающих плодов и овощей, многономенклатурностью производства, а также с износом, старением и выходом из строя технологического оборудования, датчиков и исполнительных механизмов.

Многономенклатурность производства приводит к тому, что для управления ТП озонирования необходимо либо иметь большое количество моделей объектов управления, либо строить такие модели непосредственно в ходе ТП. Последний вариант хорошо зарекомендовал себя во многих практических приложениях, хотя и не лишен недостатков [26, 27, 29].

Основная проблема заключается в том, что для построения модели объекта управления требуется некоторое время. Для непрерывного ТП озонирования это означает, что при построении модели объекта возможен уход контролируемых выходных параметров за границы допусков и, как следствие, выпуск порча продукции и не соответствие техническим требованиям (требованиям ГОСТов) и требованиям потребителей.

В данном разделе предлагается подход к адаптивной идентификации нестационарных ТП с марковскими параметрами на примере ТП озонирования при хранении сельскохозяйственной продукции с нестационарными параметрами хранимых продуктов, основанный на применении пассивной идентификации в задачах стохастического управления при построении моделей ТП в реальном масштабе времени и управлении по этим моделям [32, 33].

В общем случае представим данный ТП как нестационарный динамический многомерный многосвязный объект управления с входами p и выходами q (рис. 3.1).

На входе объекта имеются два принципиально различных типа входных каналов.

Канал возмущений образуется из n наблюдаемых входов: $X^T(N) = (x_1(N), \dots, x_n(N))$, многосвязного объекта управления $X \in R_1^n$, где R_1^n – множество допустимых входов с ненаблюдаемыми неизвестными параметрами $b_j(N)$, $j = \overline{1, n}$.

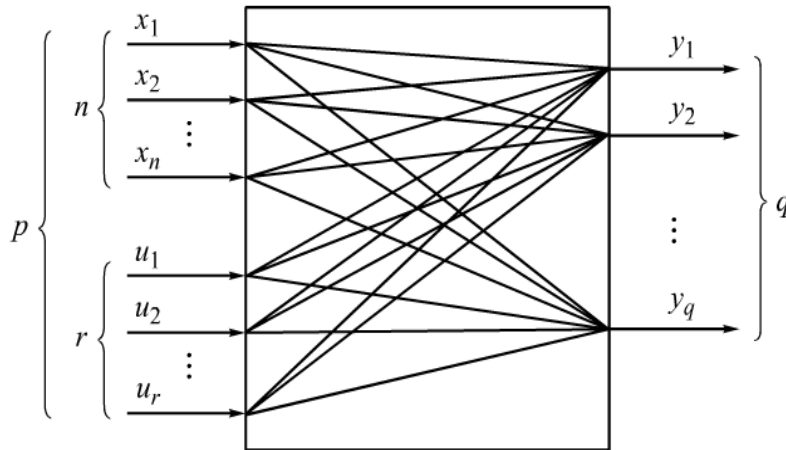


Рисунок 3.1 – Схема нестационарного динамического многомерного многосвязного объекта управления

Канал управления также наблюдаем: $U^T(N) = (u_1(N), \dots, u_r(N))$, $U \in R_2^r$ где R_2^r – множество допустимых управлений, но в отличие от канала возмущений все его параметры известны: c_k , $k = \overline{1, r}$, при этом $p = n + r$. В общем случае выход объекта представляет собой также наблюдаемый вектор: $Y^T = (y_1(N), \dots, y_q(N))$, $Y \in R_3^q$, где R_3^q – множество допустимых выходов.

Предполагаем, что известна структура нестационарного динамического объекта управления, т.е. известен порядок m дифференциального или эквивалентного ему разностного уравнения, описывающего объект.

После декомпозиции многомерного многосвязного объекта его структура может быть представлена в следующем виде (рис. 3.2).

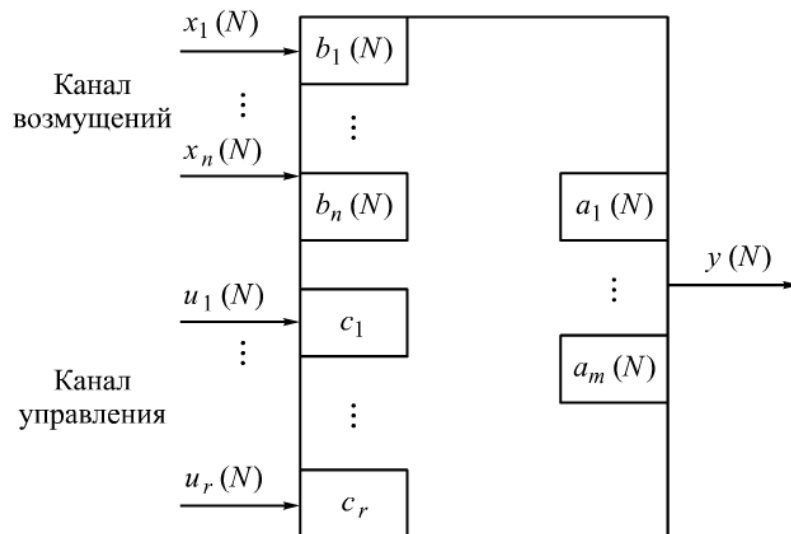


Рисунок 3.2 – Структура нестационарного динамического многомерного односвязного объекта управления: $x_j(N)$, $u_r(N)$ – измеряемые входы; $y(N)$ – выход; $b_j(N)$, $a_i(N)$ – неизвестные ненаблюдаемые коэффициенты

В общем виде многомерный многосвязный объект управления (см. рис. 3.1) аналитически можно записать как систему из q разностных уравнений, линейных относительно коэффициентов, имеющую следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1(N) = \sum_{i=1}^m a_i(N)y_1(N-i) + \sum_{j=1}^n b_j(N)x_j(N) + \sum_{k=1}^r c_k u_k(N) + v_1(N); \\ y_2(N) = \sum_{i=1}^m a_i(N)y_2(N-i) + \sum_{j=1}^n b_j(N)x_j(N) + \sum_{k=1}^r c_k u_k(N) + v_2(N); \\ \dots\dots\dots \\ y_q(N) = \sum_{i=1}^m a_i(N)y_q(N-i) + \sum_{j=1}^n b_j(N)x_j(N) + \sum_{k=1}^r c_k u_k(N) + v_q(N). \end{array} \right. \quad (3.1)$$

В этом случае многомерный односвязный объект (рис. 3.2), полученный декомпозицией из многомерного многосвязного объекта, можно записать в виде

$$y(N) = \sum_{i=1}^m a_i(N)y(N-i) + \sum_{j=1}^n b_j(N)x_j(N) + \sum_{k=1}^r c_k u_k(N) + v(N). \quad (3.2)$$

где N – дискретное время, $N = \frac{t}{T} = 0, 1, \dots$: t – текущее непрерывное время; T – интервал дискретизации; $v(N)$ – приведенный шум, действующий на объект.

Для нестационарных статических объектов управления уравнение (3.2) примет вид

$$y(N) = \sum_{j=1}^n b_j(N) x_j(N) + \sum_{k=1}^r c_k u_k(N) + v(N).$$

Исследуя предложенные многомерные односвязные линейные динамические объекты управления с сосредоточенными нестационарными параметрами (или коэффициентами $a_i(N)$, $b_j(N)$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$ разностного уравнения (3.2)) при измеримых переменных $x_j(N)$ и $y(N)$, получим следующее.

На входе объекта имеются два принципиально различных типа входных каналов:

- канал возмущений образуется из n наблюдаемых входов: $X^T(N) = (x_1(N), \dots, x_n(N))$, $X \in R_1^n$, где R_1^n – множество допустимых входов с неизвестными коэффициентами $b_k(N)$, $k = \overline{1, n}$;

- канал управления также наблюдаем: $U^T(N) = (u_1(N), \dots, u_r(N))$, $U \in R_2^r$ где R_2^r – множество допустимых управлений, но в отличие от канала возмущений все его коэффициенты известны: c_k , $k = \overline{1, r}$, при этом $p = n + r$.

Выход объекта представляет собой скаляр $y(N) \in R_3^s$, где R_3^s – множество допустимых выходов.

Таким образом, ТП озонирования как объект управления можно охарактеризовать как:

- 1) нестационарный – это означает изменение коэффициентов $a_i(N)$, $b_j(N)$, $i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$, разностного уравнения (3.2) во времени;
- 2) линейный – это означает, что оцениваемые коэффициенты $a_i(N)$, $b_j(N)$, $i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$ входят в разностное уравнение (3.2) линейно;
- 3) динамический – это означает, что зависимость входа от выхода описывается дифференциальным или эквивалентным ему разностным уравнением.

Для построения адаптивных систем управления такими нестационарными динамическими объектами был предложен класс моделей в форме разностных уравнений m -го порядка с переменными коэффициентами, вычисляемыми в процессе идентификации [36]. Модели из рассматриваемого класса могут быть представлены в форме разностного уравнения m -го порядка с n наблюдаемыми и r управляемыми входами:

$$\hat{y}(N) = \sum_{i=1}^m \hat{a}_i(N) \hat{y}(N-i) + \sum_{j=1}^n \hat{b}_j(N) x_j(N) + \sum_{k=1}^r c_k u_k(N) \quad (3.3)$$

или в векторной форме

$$\hat{y}(N) = K^T(N-1) \hat{\Phi}(N),$$

где $\hat{y}(N)$ – оценка выхода объекта (выход модели); $K(N-1)$ – вектор коэффициентов модели, $K^T(N-1) = (\hat{a}_1(N-1), \dots, \hat{a}_m(N-1), \hat{b}_1(N-1), \dots, \hat{b}_n(N-1), c_1, \dots, c_r)$; $\hat{\Phi}^T(N)$ – обобщенный вектор входов модели, $\hat{\Phi}^T(N) = (\hat{y}_1(N-1), \dots, \hat{y}_m(N-m), x_1(N), x_n(N), u_1(N), \dots, u_r(N))$.

Модели типа (3.3) называют адаптивными прогнозирующими моделями (АПМ).

Для оценки l неизвестных коэффициентов ($l = m + n$) должно быть проведено более чем l измерений изменяющейся входной величины.

В реальных ТП на объект управления действует множество шумов. Предполагаем, что шумы порождены различными факторами ТП и окружающей среды. Следовательно, они взаимно независимы. Как правило, такая информация о характере множества шумов, как закон распределения, функция распределения, моментные характеристики, отсутствует.

В результате аддитивного наложения множества шумов результирующий шум, приведенный к выходу объекта $y(N)$, можно рассматривать как гауссовый с нулевым средним $M_v\{v(N)\} = 0$ и дисперсией $D_v\{v(N)\} = \sigma_v^2 : v(N) = N(0, \sigma_v^2)$. Данное предположение о характере шума непринципиально, однако существенно упрощает расчеты [93].

3.2 Идентификация и управление ТП озонирования

Построение адаптивной системы управления ТП озонирования. В адаптивных системах управления нестационарными динамическими объектами выделяются два этапа работы – идентификация (обучение) и управление.

На этапе обучения производится идентификация объекта управления и построение адаптивной прогнозирующей модели (АПМ) $y(N)$ [106]. На следующем этапе начинается управление $U(N)$, которое рассчитывается на основе информации полученной на этапе обучения, т. е. АПМ $y(N)$, и текущей информации по наблюдениям за входом $X(N)$ и выходом объекта управления $y(N)$ [98, 106]:

$$U(N) = \Psi(X(N), y(N), \hat{y}(N)), \quad (3.4)$$

где $\Psi(\cdot)$ – закон управления; вход объекта управления $X(N)$: выходы: объекта управления $y(N)$ и адаптивной прогнозирующей модели $y(N)$.

Для ТП такой подход позволяет удерживать выходные характеристики выпускаемого продукта в более жестких границах и тем самым повысить его качество.

Разделение во времени обучения и управления необходимо для оптимизации в реальном масштабе времени системы управления, однако при этом не гарантируется оптимальность на всем протяжении процесса (т. е. оценки коэффициентов модели являются локально оптимальными) [98, 108].

Таким образом, адаптивную систему управления ТП озонирования можем представить в виде схемы на рисунке 3.3.

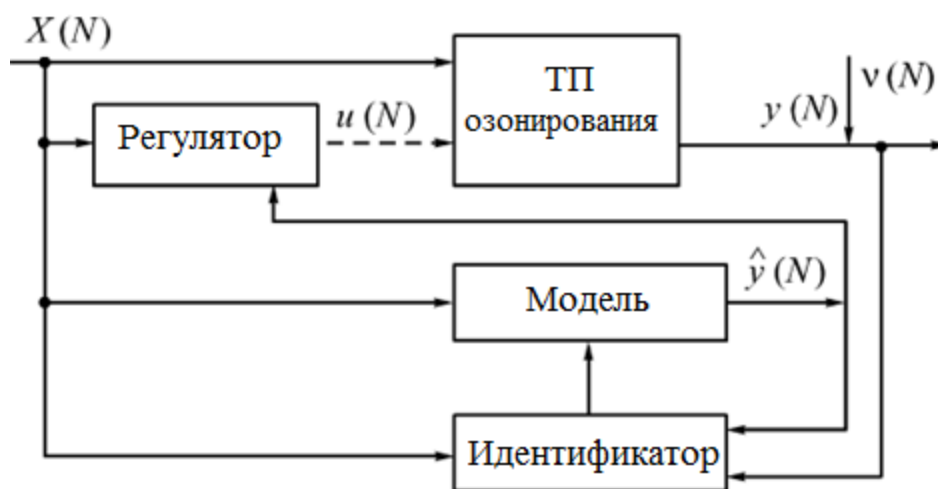


Рисунок 3.3 – Схема адаптивной системы управление ТП с идентификатором

При переходе от одной партии плодоовощной продукции к другой характер выходов объекта управления $y(N)$ и прогнозирующей модели $y(N)$ можно оценить аналитически или получить с помощью имитационного моделирования.

Обоснование проекционного алгоритма идентификации. Обозначим ошибку прогноза выхода модели

$$(\varepsilon(N) = y(N) - \hat{y}(N)). \quad (3.5)$$

Выберем критерий качества идентификации $J(N)$. На основе этого критерия должен быть синтезирован алгоритм идентификации. В качестве критерия синтеза часто используется минимум средних квадратов ошибок прогноза выхода $\varepsilon^2(N)$. Из условия минимума критерия: $J(N) = M\{\varepsilon^2(N)\}$, можем записать рекуррентный алгоритм идентификации в форме [109]

$$K(N) = K(N - 1) + \Gamma(N)(y(N) - K^T(N - 1)\Phi(N)\Phi(N)), \quad (3.6)$$

где $K(0)$ – коэффициент модели в начальный (0) момент времени, $K(0) = K_0$; $\Gamma(N)$ – матрица усиления.

В практике идентификации для рекуррентного нахождения оценок $K(N)$ используется алгоритм Чадеева-Качмажа [109].:

$$K(N) = K(N - 1) + \frac{y(N) - K^T(N - 1)X(N)}{\mu + \Phi^T(N)\Phi(N)}, \quad (3.7)$$

Величина μ гарантирует невырожденность оценок $K(N)$, получаемых по алгоритму.

Классическая теория построения моделей объектов управления – идентификация – базируется на предположении о стационарности объектов управления и существовании некоторых неслучайных параметров, характеризующих поведение этих объектов.

Поэтому при реальной идентификации объектов управления целесообразно использовать проекционные алгоритмы (3.7).

Обобщенным критерием перехода от идентификации к управлению является выполнение условий [36]:

$$\begin{cases} \mu(i): \text{algn}(\Delta y(N_1)) = \text{algn}(\Delta y(N_2)) \& \Delta y(N_3) = 0 \& \eta(N_1) > \eta(N_2) > \eta(N_3); \\ \eta(i) < 1 \end{cases} \quad (3.8)$$

В случае невыполнения данных условий адаптивная система остается в режиме идентификации. На n -м шаге идентификации объекта управления происходит в разомкнутом контуре управления.

Двухконтурная адаптивная система управления ТП озонирования. Для случая нестационарного динамического многомерного односвязного объекта управления (см. рис. 3.2) разработана двухконтурная адаптивная система управления ТП озонирования с нестационарными параметрами (рис. 3.4). В которой к первому контуру адаптации (на базе адаптивной системы с идентификатором (АСИ)) добавлен второй контур адаптации, включающий группу лиц, принимающих решение (ЛПР), которыми являются эксперты технологи, вырабатывающие усредненное решение по качеству хранимого продукта.

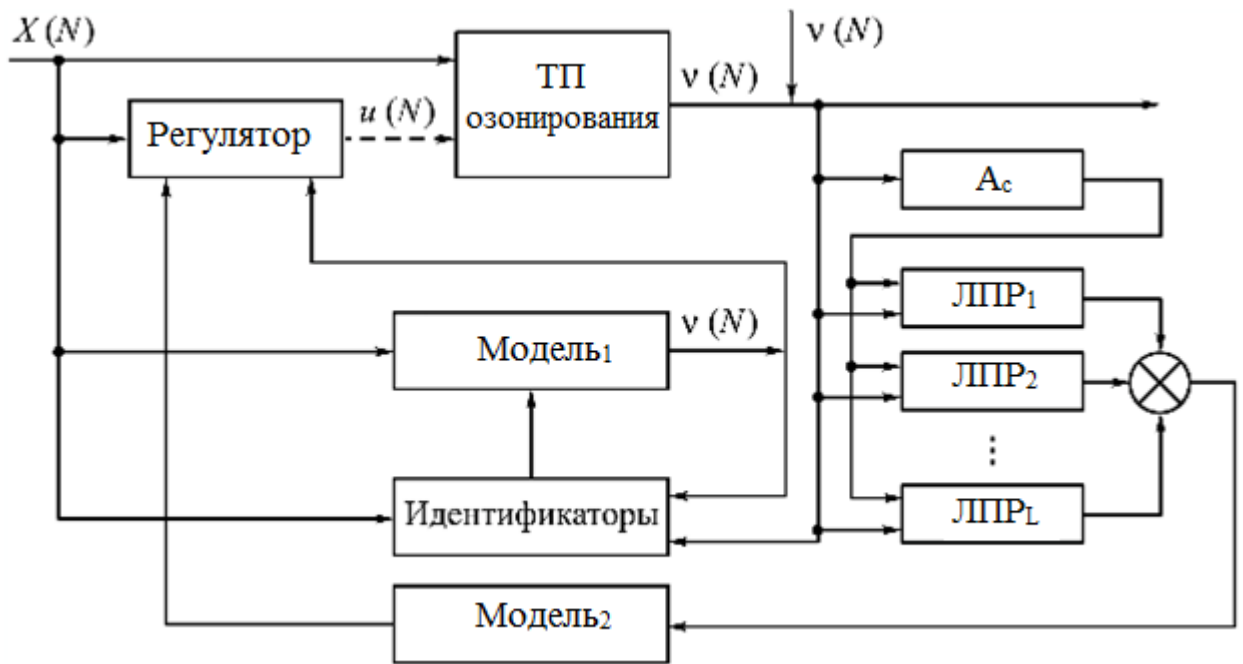


Рисунок 3.4 – Схема двухконтурной адаптивной системы управления ТП озонирования с нестационарными параметрами

Решение группы экспертов-технологов ($ЛПР_1, ЛПР_2, \dots, ЛПР_L$) включает в себя Модель₂, на основе которой в функционирование регулятора вносятся изменения. Таким образом, сигнал управления $u(N)$ (рис. 3.4) является линейной комбинацией сигналов АСИ – первого контура адаптации (где Модель₁ – модель первого контура адаптации – адаптивная прогнозирующая модель АСИ) и второго контура адаптации (где Модель₂ – модель второго контура адаптации – вербальная модель ЛПР) [35].

В этом случае управляющее воздействие примет вид

$$U(N) = \Psi(X(N), y(N), \hat{y}(N)) \oplus \Delta \left(y(N), \frac{1}{L} \sum_i^L ЛПР_i \right), \quad (3.9)$$

где \oplus – операция конкатенации (объединения); $\Delta(\dots)$ – приращение управления, устанавливаемое технологом на базе решения группы экспертов-технологов ($ЛПР_1, ЛПР_2, \dots, ЛПР_L$); $\frac{1}{L} \sum_i^L ЛПР_i$ – усредненное решение L экспертов-технологов по качеству продукта.

Математическое описание двухконтурной адаптивной системы управления можно представить в аналитической форме:

$$\begin{aligned} y(N) &= L_1(A(N), B(N), Y(N-1), U(N), C); \\ \hat{y}(N) &= L_2(\hat{A}(N), \hat{B}(N), \hat{Y}(N-1), U(N), C); \\ (N) &= F_1(a_i(N-1), \gamma_{ai}, \xi_{ai}(N)); \\ b_i(N) &= F_2(b_i(N-1), \gamma_{bi}, \xi_{bi}(N)); \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned}\hat{a}_i(N) &= G_1(\hat{a}_i(N-1), y(N), \hat{y}(N), X(N)); \\ \hat{b}_i(N) &= G_2(\hat{b}_i(N-1), y(N), \hat{y}(N), X(N)) \\ U(N) &= \Psi(X(N), y(N), \hat{y}(N)) \oplus \Delta\left(y(N), \frac{1}{L} \sum_i^L \text{ЛПП}_i\right),\end{aligned}$$

где γ_{ai} , $\xi_{ai}(N)$, γ_{bi} , $\xi_{bi}(N)$ – параметры, определяющие стохастический процесс изменения коэффициентов объекта,

$$\begin{aligned}Y(N-1) &= (y(N-1), y(N-2), \dots, y(N-m)); \\ \hat{Y}(N-1) &= (\hat{y}(N-1), \hat{y}(N-2), \dots, \hat{y}(N-m)); \\ A(N) &= (a_1(N), a_2(N), \dots, a_m(N)); \\ \hat{A}(N) &= (\hat{a}_1(N), \hat{a}_2(N), \dots, \hat{a}_n(N)) \\ B(N) &= (b_1(N), b_2(N), \dots, b_n(N)); \\ \hat{B}(N) &= (\hat{b}_1(N), \hat{b}_2(N), \dots, \hat{b}_n(N)) \\ C &= (c_1, c_2, \dots, c_r); \\ U(N) &= (u_1(N), u_2(N), \dots, u_r(N)).\end{aligned}\tag{3.11}$$

На рисунке 3.4 обозначение A_c – скалярный анализатор (датчик с памятью), на вход которого поступает скалярный выход $y(N)$. Корректирующее управление, вносимое на основе решения группы экспертов-технологов в ТП с нестационарными параметрами, состоит в изменении диапазонов регулирования технологических параметров, режимов обработки и качества плодоовощной продукции, установок, оборудования, ассортимента и т. д.

В общем случае рассматриваемый ТП озонирования является нестационарным динамическим многомерным многосвязным объектом управления. Поэтому на основе двухконтурной адаптивной системы управления (см. рис. 3.4) была разработана адаптивная система управления ТП с нестационарными параметрами для случая нестационарного динамического многомерного многосвязного объекта управления (рис. 3.5).

В этой схеме A_B векторный анализатор (компьютерная система с элементами искусственного интеллекта, на вход которой поступает векторный выход $Y(N) = (y_1(N), y_2(N), \dots, y_q(N))$; M_2 – интегрированная вербальная модель; $M_{2(1)}, M_{2(2)}, \dots, M_{2(q-1)}, M_{2q}$ – соответственно вербальные модели для АСИ₁, АСИ₂, ..., АСИ_(q-1), АСИ_(q). Модель₁₍₁₎, Модель₁₍₂₎, Модель_{1(q)} АПМ – для АСИ₁, АСИ₂, ..., АСИ_(q-1), АСИ_(q) соответственно [34].

Идентификация технологического процесса озонирования. В ТП озонирования их непрерывный характер связан с дискретным поступлением исходного сырья (партий продукции) от разных товаропроизводителей, при этом уровень наличия микроорганизмов (плесневых грибов) в каждой партии могут быть различны.

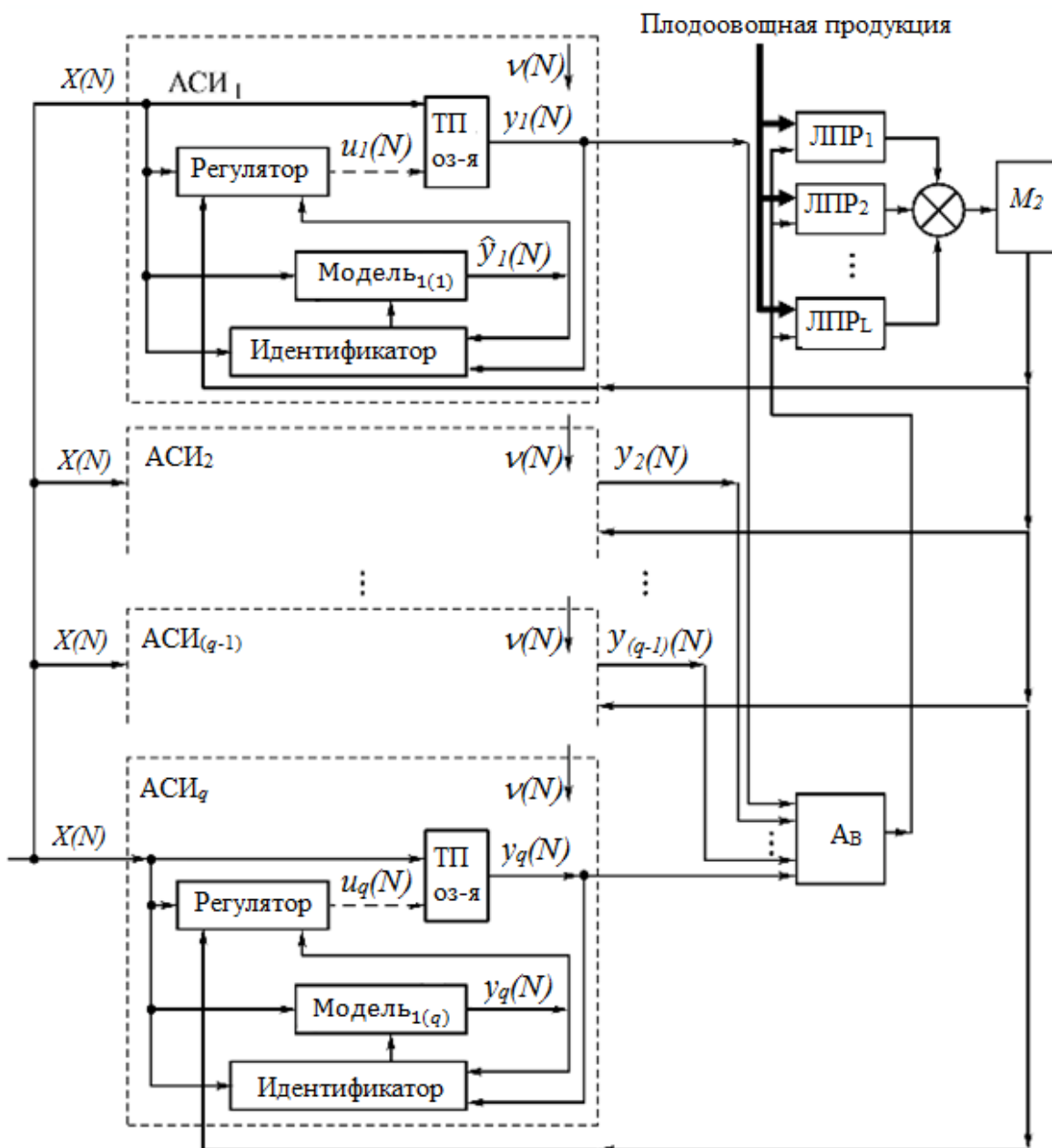


Рисунок 3.5 – Схема адаптивной системы управления ТП озонирования с нестационарными параметрами (для случая нестационарного динамического многомерного многосвязного объекта управления)

Государственные стандарты (ГОСТы) накладывают определенные ограничения на уровень наличия микроорганизмов хранимой плодоовощной продукции. Такими входными измеряемыми параметрами являются характеристики партии плодоовощной продукции, представленные в таблице 3.1.

Согласно ГОСТам допускаются определенные отклонения указанных характеристик. Следствием этого являются отклонения уровня наличия микроорганизмов плодоовощной продукции.

Таблица 3.1 – Измеренные входные характеристики партии плодоовощной продукции

Обозначение	Род (вид) микроорганизма заражения плодоовощной продукции	Единица измерения
a_1	Microbacterium	Кол-во/см ²
a_2	Lactobacilli	Кол-во/см ²
a_3	Corynebacterium	Кол-во/см ²
a_4	Pseudomonas pitida	Кол-во/см ²
a_5	Pseudomonas sporum	Кол-во/см ²
a_6	Pseudomonas putrefa	Кол-во/см ²
a_7	Acinebobacter	Кол-во/см ²
a_8	Flavobacterium	Кол-во/см ²

В связи с вышеизложенным для ТП озонирования, характеризующихся нестационарностью параметров поступающих хранимой плодоовощной продукции, целесообразен переход к локально-оптимальному адаптивному управлению и использованию измерительных устройств, обеспечивающих инвариантность к изменениям уровня наличия микроорганизмов хранимой плодоовощной продукции [36].

При адаптивном управлении ТП озонирования традиционно измеряемые входные характеристики партии хранимой плодоовощной продукции (табл. 3.1) могут быть дополнены характеристиками представленными в табл. 3.2 (в целях повышения точности адаптивных прогнозирующих моделей).

Анализ таблицы 3.2 показывает, что в общем случае статистические функции f_j ($j = \overline{1, n}$; $n = 7$) – нелинейные. Конкретный вид нелинейности не принципиален, так же как и статистическая значимость аргументов α_i для каждой функции f_j .

Функция $z(\omega)$ зависит от химического состава плодоовощной продукции, его сухости, экстрактивности, наличия и уровня микроорганизмов и т. д.

Входные воздействия для каждой партии плодоовощной продукции в общем случае – случайные функции с низкочастотной и высокочастотной компонентами можно представить в виде фильтра первого порядка:

$$x_i(N) = (1 - \beta)x_i(N - 1) + \beta\xi(N),$$

Таблица 3.2 – Дополнительно измеряемые характеристики партии плодоовощной продукции

Статистическая функция	Род (вид) микроорганизма заражения плодоовощной продукции
$x_1 = f_1(\alpha_1, \dots, \alpha_8, z(\omega))$	Microbacterium
$x_2 = f_2(\alpha_1, \dots, \alpha_8, z(\omega))$	Lactobacilli
$x_3 = f_3(\alpha_1, \dots, \alpha_8, z(\omega))$	Corynebacterium
$x_4 = f_4(\alpha_1, \dots, \alpha_8, z(\omega))$	Pseudomonas pitida
$x_5 = f_5(\alpha_1, \dots, \alpha_8, z(\omega))$	Pseudomonas sporum
$x_6 = f_6(\alpha_1, \dots, \alpha_8, z(\omega))$	Pseudomonas putrefa
$x_7 = f_7(\alpha_1, \dots, \alpha_8, z(\omega))$	Acinebobacter
$x_8 = f_8(\alpha_1, \dots, \alpha_8, z(\omega))$	Flavobacterium

где $0 \leq \beta \leq 1$, β – параметр, определяющий скорость изменения процесса; $\xi(N)$ – случайная величина со средним $M_{\xi}\{\xi(N)\} = 0$ и дисперсией $M_{\xi}\{\xi(i)\xi(j)\} = \sigma_{\xi}^3$.

В силу того, что параметры поступающей на хранение плодоовощной продукции могут существенно отличаться от партии к партии, на первой стадии хранения различные партии плодоовощной продукции смешиваются. Полученную смесь будем называть новой партией плодоовощной продукции, поступающего на вход ТП зонирования.

Усреднение параметров $b_j(N)$, $j = \overline{1, n}$, $a_i(N)$, $i = \overline{1, m}$, осуществляемое на первой стадии ТП, позволяет практически использовать гипотезу о несущественном изменении параметров сырья от партии к партии. В силу этого предполагаем, что коэффициенты объекта $a_i(T)$, $b_j(T)$ изменяются несущественно при переходе от одной партии плодоовощной продукции к другой и могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned} |b_j(T+1) - b_j(T)| &< b_j(T) \\ |a_i(T+1) - a_i(T)| &< a_i(T) \end{aligned}$$

Это означает, что подстройка коэффициентов уравнения, описывающего ТП для любой новой партии плодоовощной продукции, осуществляется достаточно быстро [34].

В приложении к ТП озонирования уравнение адаптивной прогнозирующей модели принимает следующий вид:

$$\hat{y}(N) = \hat{a}_1(N)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(N)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n \hat{b}_j(N)x_j(N) \quad (3.12)$$

или с учетом равенств в табл. 2.2 может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} \hat{y}(N) = \hat{a}_1(N)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(N)\hat{y}(N-2) + \\ + \sum_{j=1}^n \hat{b}_j(N)f_j(\alpha_1(N), \dots, \alpha_8(N), z(\omega)). \end{aligned} \quad (3.13)$$

Класс моделей, представленных разностным уравнением (3.13), будем называть также классом адаптивных прогнозирующих гетерогенных (неоднородных по параметрам) моделей (АПГМ).

Считаем ТП озонирования является устойчивым, что объясняется самой природой реального производственного процесса. Но адаптивная прогнозирующая модель, с помощью которой осуществляется управление нестационарным ТП, в произвольные случайные моменты времени может выйти за границы устойчивости [35].

Для обеспечения устойчивости всей системы (объект, модель, регулятор) необходимо контролировать устойчивость адаптивной прогнозирующей модели на каждом шаге идентификации. В этом случае можно использовать алгоритм синтеза адаптивной прогнозирующей модели нестационарного динамического объекта управления, представленный на рисунке 3.6 [36].

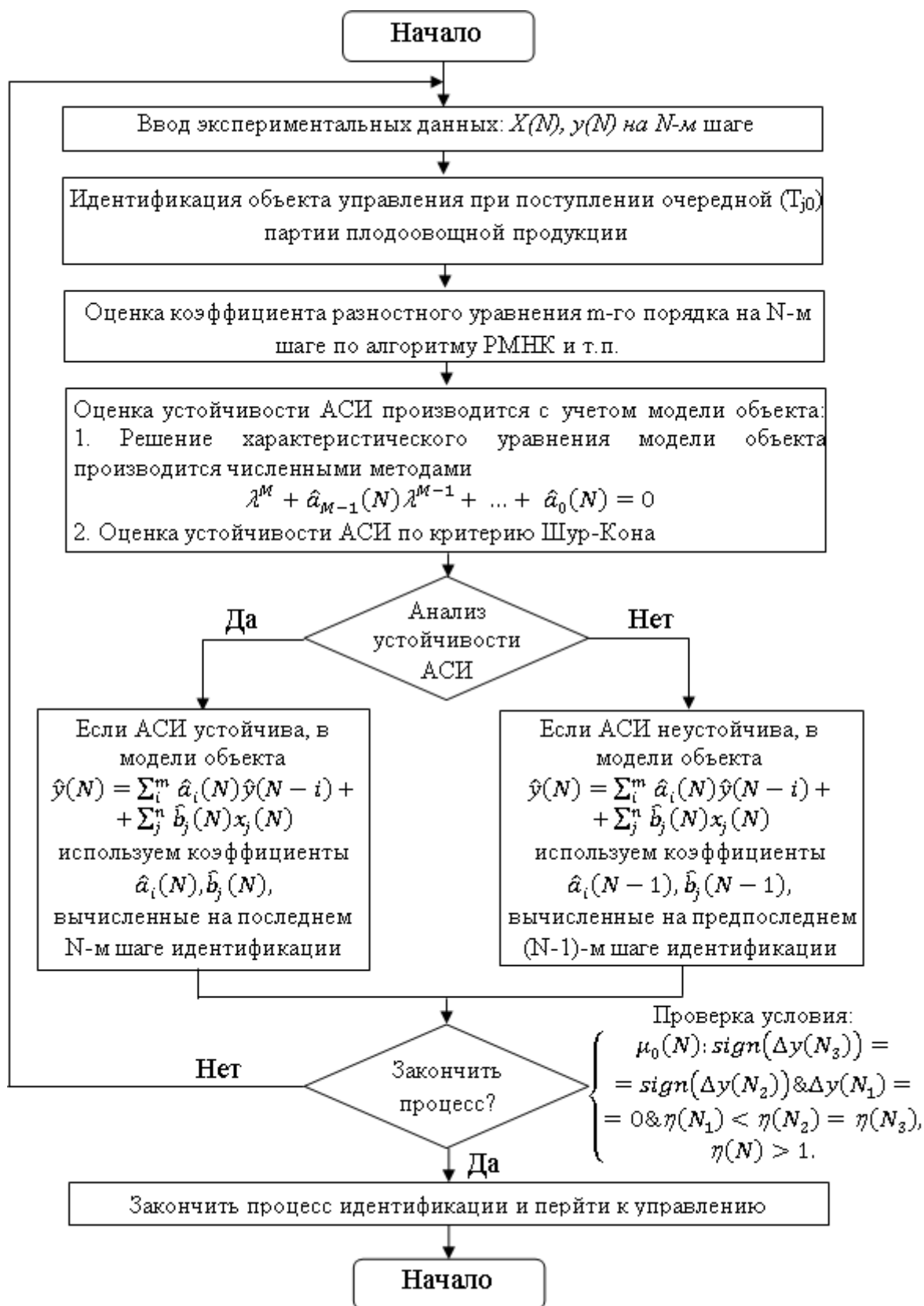


Рисунок 3.6 – Алгоритм синтеза адаптивной прогнозирующей модели управления ТП озонирования

С целью оценки устойчивости адаптивной системы с идентификатором воспользуемся алгебраическим критерием устойчивости Шур-Кона для

В том случае, когда необходимо получать прогноз выхода на каждом шаге, система уравнений (3.15) может быть записана в виде

$$\begin{aligned}
 \hat{y}(N+1|_{T_1}) &= \hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N|_{T_1}) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-1|_{T_1}) + \\
 &+ \sum_{j=1}^n \hat{b}_j(T_1)x_j(N) + \sum_{i=1}^r c_i u_i(N); \\
 \hat{y}(N+1|_{T_2}) &= \hat{a}_1(T_2)\hat{y}(N|_{T_2}) + \hat{a}_2(T_2)\hat{y}(N-1|_{T_2}) + \\
 &+ \sum_{j=1}^n \hat{b}_j(T_2)x_j(N) + \sum_{i=1}^r c_i u_i(N); \\
 &\dots \dots \dots (3.16) \\
 \hat{y}(N+1|_{T_k}) &= \hat{a}_1(T_k)\hat{y}(N|_{T_k}) + \hat{a}_2(T_k)\hat{y}(N-1|_{T_k}) + \\
 &+ \sum_{j=1}^n \hat{b}_j(T_k)x_j(N) + \sum_{i=1}^r c_i u_i(N),
 \end{aligned}$$

где $\hat{y}(N|_{T_1}), \hat{y}(N|_{T_2}), \dots, \hat{y}(N|_{T_k})$ определяются из системы уравнений (3.15).

Адаптивные прогнозирующие модели (3.15) и (3.16) позволяют оценить возможные значения $y_i, i = \overline{1, q}$ по наблюдаемым значениям оценок выхода в предыдущий и настоящий моменты времени (либо по измеряемым значениям выхода), наблюдаемым значениям неуправляемых $X^T(N) = (x_1(N), x_2(N), \dots, x_n(N))$ и управляемых входов $U^T(N) = (u_1(N), u_2(N), \dots, u_r(N))$.

Эти модели порождают локально-оптимальные управляющие воздействия на каждом из рассматриваемых интервалов T_{j_0} ТП озонирования.

Рассмотрим адаптивный регулятор без ограничений на амплитуду сигнала, обеспечивающий поддержание любого значения прогноза выхода.

Рассмотрим адаптивную систему только с одним управляемым входом: $r = 1$. Для упрощения записи в модели объекта для прогноза выхода признак принадлежности к соответствующей партии будем опускать, т. е. $\hat{y}(N|_{T_1}) = \hat{y}(N)$, и аналогично для каждой последующей партии. Таким образом, для первой партии плодоовощной продукции модель объекта с одним входом примет вид

$$\hat{y}(N) = \hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n \hat{b}_j(T_1)x_j(N) + cu(N)$$

Уравнение регулятора будет выглядеть следующим образом:

$$u(N) = \frac{\hat{y}(N) - (\hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n \hat{b}_j(T_1)x_j(N))}{c}. \quad (3.17)$$

Адаптивный регулятор (3.17) соответствует ТП озонирования, когда единственным управляемым входом является концентрация озона в закрытом помещении, в котором плодоовощная продукция подвергается обработке озоном.

Оценка дисперсии выхода объекта, в качестве которой может быть использовано математическое ожидание квадрата выхода объекта $M_y\{y^2(N)\}$ т. е. только первая компонента дисперсии объекта, и математическое ожидание квадрата выхода модели $M_x\{\hat{y}^2(N)\}$, также не смещены по времени относительно друг друга.

Будем искать такое управление, которое минимизирует средний квадрат выхода объекта для i -й партии продукции:

$$u_t \left(\frac{N}{T_t} \right) = \arg \min M \left\{ y^2 \left(\frac{N}{T_t} \right) \right\}.$$

Эта задача эквивалентна поиску управления, минимизирующего средний квадрат выхода модели адаптивной системы управления:

$$u_t \left(\frac{N}{T_t} \right) = \arg \min M \left\{ \hat{y}^2 \left(\frac{N}{T_t} \right) \right\},$$

т.е необходимо из условия $\frac{\sigma}{\sigma u_t} M \left\{ \hat{y}^2 \left(\frac{N}{T_t} \right) \right\} = 0$ найти $u(N)$

Рассмотрим модель объекта (3.15). Дисперсия выхода модели для первой партии плодоовощной продукции определяется из следующего выражения:

$$D\{\hat{y}(N/T_t)\} = M_x\{(\hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n \delta_j(T_1)x_j(N) + \sum_{i=1}^r c_i u_i(N))^2\} - (M_x \hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n b_j(T_1)x_j(N) + \sum_{i=1}^r c_i u_i(N))^2 \quad (3.18)$$

Аналогично из системы (3.15) можно определить дисперсию выхода для любой другой партии плодоовощной продукции. Рассмотрим объект с одним управляемым входом и шумом на выходе:

$$y(N) = a_1(T_1)y(N-1) + a_2(T_1)y(N-2) + \sum_{j=1}^n b_j(T_j)x_j(N) + cu(N) + v(N) \quad (3.19)$$

В адаптивной системе управления этот объект имеет следующую модель:

$$\hat{y}(N) = a_1(T_1)\hat{y}(N-1) + a_2(T_1)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n b_j(T_1)x_j(N) + cu(N) \quad (3.20)$$

с помощью, которой будем искать управление, минимизирующее средний квадрат выхода объекта (3.18):

$$M \left\{ \hat{y}^2 \left(\frac{N}{T_1} \right) \right\} = M_x \left\{ (\hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n \delta_j(T_1)x_j(N) + cu(N))^2 \right\}$$

В данном случае необходимо найти минимум функции одной переменной, который ищем из условия:

$$\frac{\partial}{\partial u} M \left\{ \hat{y}^2 \left(\frac{N}{T_1} \right) \right\} = 0$$

Операции нахождения среднего $M\{\}$ и вычисления производной $\frac{d}{du}$ – линейные операции, поэтому коммутативные.

Для $M_x\{(\bullet)^2\}$ получаем:

$$\begin{aligned} \frac{d}{du} M_x \{ (\hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n \delta_j(T_1)x_j(N) + cu(N))^2 \} = \\ M_x \left\{ \frac{d}{du} ((\hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n \delta_j(T_1)x_j(N) + cu(N))^2) \right\} = \\ M_x \{ 2c((\hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n \delta_j(T_1)x_j(N) + \\ 2cu(N))^2) \} = 2cM_x \{ (\hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n \delta_j(T_1)x_j(N) + \\ 2c^2u(N))^2 \} \end{aligned}$$

Приравнивая нулю последнее выражение, находим

$$M_x \left\{ (\hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n b_j(T_1)x_j(N) \right\} + cu(N) = 0$$

Откуда и получаем искомое адаптивное управление с отрицательной обратной связью:

$$u(N) = -\frac{1}{c} M_x \left\{ (\hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n b_j(T_1)x_j(N) \right\} \quad (3.21)$$

Подставляем найденное значение управления в уравнение модели (3.19) и объекта (3.20):

$$\begin{aligned} \hat{y}(N) = & \hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) \\ & + \sum_{j=1}^n b_j(T_1)x_j(N) \\ & - M_x \left\{ (\hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n b_j(T_1)x_j(N)) \right\}; \end{aligned}$$

Процедура построения регулятора для системы с r управляемыми входами принципиально ничем не отличается от рассмотренных случаев, поэтому можно без доказательства привести уравнения регулятора для r входов:

$$\begin{aligned} u_1(N) &= -\frac{1}{c_1} M_x \{ (\hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n b_j(T_1)x_j(N)) \}; \\ u_2(N) &= -\frac{1}{c_2} M_x \left\{ (\hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n b_j(T_1)x_j(N)) \right\} \\ &\dots\dots\dots \\ u_r(N) &= -\frac{1}{c_r} M_x \left\{ (\hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n b_j(T_1)x_j(N)) \right\} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Для синтеза r -мерного регулятора, гарантирующего минимум дисперсии выхода объекта, как видно из (3.22), необходимо:

- 1) определить среднее значение выхода модели без управляющего воздействия $M_x\{\bullet\}$
- 2) для каждого из r каналов управления рассчитать величину управляющего воздействия, зная характеристики канала управления, с помощью отношения

$$u_t = \frac{M_x\{\bullet\}}{c_i}$$

где $i = \overline{1, r}$.

С найденным управлением уравнения модели и объекта, гарантирующие минимальную дисперсию выхода, будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{y}(N) = & \hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) \\ & + \sum_{j=1}^n b_j(T_1)x_j(N) \\ & - r M_x \left\{ \hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n b_j(T_1)x_j(N) \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y(N) = & \hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) \\
& + \sum_{j=1}^n b_j(T_1)x_j(N) - rM_x \left\{ \hat{a}_1(T_1)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(T_1)\hat{y}(N-2) \right. \\
& \left. + \sum_{j=1}^n b_j(T_1)x_j(N) \right\} + v(N)
\end{aligned} \tag{3.23}$$

Анализ k стратегий управления $u_t(\frac{N}{T_t})$ позволяет выбрать номинальный режим управления $\bar{U}(N) = \{\bar{u}_1(N), \dots, \bar{u}_t(N)\}$, соответствующий модели объекта со средними значениями коэффициентов

$$\begin{aligned}
\bar{u}_t(N) = \arg \min_{u_t} & D\{\bar{a}_1\}\hat{y}(N-1) + \bar{a}_2\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n \bar{b}_j(T_1)x_j(N) + \\
& + \sum_{i=1}^r c_i u_i(N)
\end{aligned} \tag{3.24}$$

где $\bar{a}_1 = \frac{T}{N} \sum_{i=1}^{\frac{N}{T}} a_1(t)$, $\bar{a}_2 = \frac{T}{N} \sum_{i=1}^{\frac{N}{T}} a_{21}(t)$, $\bar{b}_j = \frac{T}{N} \sum_{j=1}^{\frac{N}{T}} b_j(t)$, средние значения коэффициентов $a_1, a_2, b_1, b_2, \dots, b_j$ для k партий плодоовощной продукции $j = \overline{1, n}, n = 7, i = \overline{1, r}, r = 5$.

Номинальный режим управления $\bar{U}(N)$ дает возможность управлять ТП озонирования без обучения (без реализации схемы оценок коэффициентов объекта и построения его модели) в среднем с минимальной дисперсией. Этот режим управления может быть положен в основу управляющего алгоритма на стадии идентификации (рис. 3.4), когда контур управления разомкнут и ТП озонирования переведен в кратковременный режим подстройки коэффициентов модели [33].

3.4 Разработка блока автоматического регулирования частоты генератора озона

Для оптимального подбора и регулирования концентрации озона при хранении различных пищевых продуктов разработан генератор для выработки высоковольтных импульсов, подаваемых на озонаторные ячейки барьерного разряда и схема автоматического регулирования концентраций озона в закрытом объеме [94].

Концентрация озона измеряется с помощью экспериментального образца озонометра. Не вдаваясь в подробности самого озонометра, следует обратить внимание на его выходные параметры, которое в электрическом виде представлено в виде двуполярного микроамперметра, которое имеет собственное внутреннее сопротивление, с которого и есть возможность снимать приращение напряжения с озонометра, как следствие закона Ома, т.е. приращение тока микроамперметра, вызывает приращение напряжения на сопротивлении микроамперметра.

Так как выход озонометра является высокоомным (сотни кОм), а сопротивление самого микроамперметра достаточно малы (единицы кОм), необходимо предварительно усилить значение выходного тока, а потом его подавать на микроамперметр.

Перед нами стояла задача по разработке устройства для автоматического контроля и регулирования концентраций озона в закрытом объеме, обеспечивающая выбор режима озонирования объема при постоянстве концентрации озона за установленное время. Достижимым техническим результатом является обеспечение автоматического выбора режима озонирования закрытого объема, когда при каждом режиме поддерживается постоянство концентрации озона в объеме за установленное время.

Задача решается тем, что в отличие от известного устройства, содержащего коронирующие иглы, выполненные в виде игл на сетках, направлены в противоположные стороны и подсоединены к разным полюсам источника питания, а внешние электроды расположены напротив коронирующих игл, в предлагаемом изобретении содержатся озонометры (ОМ), количество которых определяется опытным путем в соответствии с объемом закрытого помещения, микропроцессор (МП), предназначенный для работы по заданной программе при выборе режима по концентрации озона и по времени озонирования закрытого объема и импульсный озонатор (ОЗ), обеспечивающий электронное регулирование выхода озона по частоте высоковольтных импульсов [94].

В качестве озонометра может быть использован озонометр типа [95], в котором, влияния степени запыленности воздуха и его атмосферного состояния (температура, давления и влажность) на точность контроля сведены к минимуму. Кроме того, применение балансной схемы измерения позволяет существенно снизить погрешности контроля озона, появляющиеся из-за существующего отличия электрических характеристик разнополярных разрядных промежутков. Следует отметить, что в качестве озонометра может быть использован любой другой тип озонометрического прибора, главное, он был приспособлен к работе в САР. Количество озонометров, устанавливаемых для контроля зависит от объема закрытого пространства и определяется опытным путем.

Микропроцессор (МП) имеет многоточечный вход для озонометров и один выход для блока автоматической регулировки частоты (БАРЧ) высоковольтных импульсов. МП работает по заданной программе: может осуществить точечный контроль концентрации озона, суммирует и усредняет поступившие данные от озонометров, выдает сигналы для регулирования выхода озона с озонатора.

Так как образец БАРЧ является макетом экспериментального назначения, предназначенным в основном для опробования разных режимов работы генератора озона и озонометра, конструктивно он выполнен в модульном варианте и состоит из 5 различных модулей [99]:

1. Предусилитель с микроамперметра как входной каскад БАРЧ.

2. Основной регулируемый усилитель, сопряженный с генератором импульсов, управляемый напряжением (ГУН).

3. Модуль микроконтроллера ARDUINO UNO R3, имеющий встроенный 10-разрядный АЦП, преобразующий медленноменяющееся постоянное напряжение в соответствующий цифровой код с ТТЛ-уровнями (диапазон $0 \div +5\text{В}$), а также встроенный цифровой ШИМ выход.

4. Модуль цифро-аналогового преобразователя, преобразующий значение цифрового ШИМ-выхода в соответствующее аналоговое постоянное напряжение, подаваемое на вход управляемое частотой ГУН.

5. Подвешенный независимый источник вторичных напряжений ($+5\text{В}$, $\pm 15\text{В}$), применяемый для питания интегральных схем и полупроводниковых приборов БАРЧ, необходимость изготовления которого вызвана разницей между «землями» собственно озонатора, БАРЧ и генератора озона.

Производительность озонатора по озону определяется частотой подачи импульсов поджига тиристорного ключа, поэтому вместо способа регулирования высокого напряжения используется блок автоматической регулировки частоты высоковольтных напряжений (БАРЧ). При режиме поддержки постоянства концентрации озона в объеме устанавливается определенная частота управляемого генератора импульсов поджига тиристора, которая соответствует заданному значению содержимого озона. Любое отклонение данных, суммарных или усредненных значений, поступающих на вход БАРЧ компенсируется изменением скважности высоковольтных импульсов.

На рисунке 3.7 представлена функциональная схема устройства, частично расположенное в закрытом объеме (ЗО).

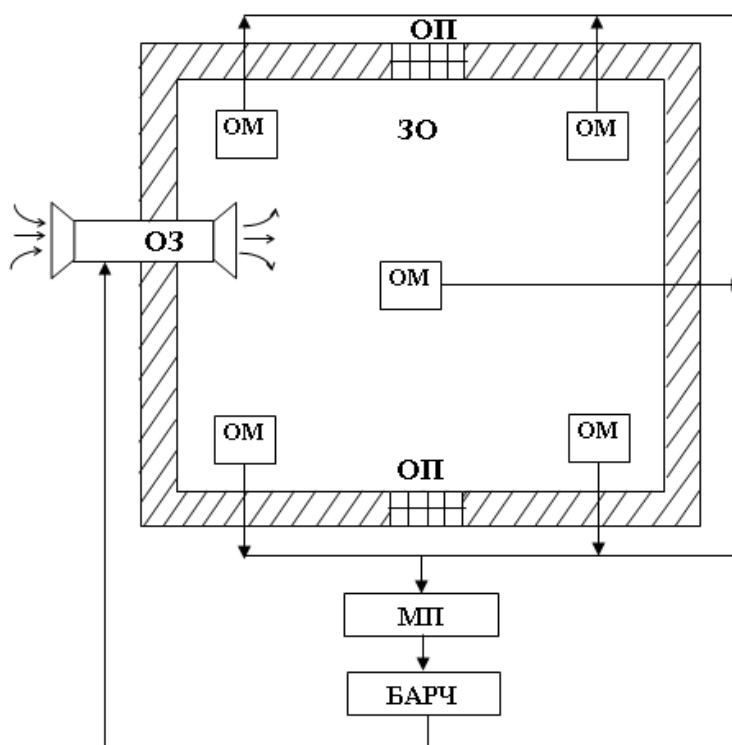


Рисунок 3.7 – Функциональная схема устройства САР

Озонометры ОМ располагаются внутри закрытого помещения ЗО, где измеряется концентрация озона. Количество озонометров и их места расположения определяется опытным путем. Озонатор ОЗ частично входит в зону закрытого объема, а подпитка его свежим воздухом производится снаружи ЗО. Микропроцессор МП и БАРЧ располагаются вне зоны закрытого объема ЗО. Ввиду того, что озоновоздушная смесь нагнетается в ЗО через озонатор с помощью компрессора, то в ЗО может образоваться избыток давления воздуха. Для приведения его в нормальное состояние используются окна с озонопоглотителями из пористого силикагеля (ОП).

Сигналы - напряжения от каждого озонометра по отдельности поступает на вход МП, где по заданной программе сигналы преобразуются в удобную форму, необходимой для управления блоком БАРЧ. Блок БАРЧ включает озонатор ОЗ, который будет работать до достижения заданной концентрации озона в закрытом объеме ЗО, причем в этот же момент включается датчик времени в МП. Ввиду того, что озон обязательно будет взаимодействовать с продуктом, находящимся в ЗО, то концентрация его будет постоянно снижаться и поэтому, для восполнения потери озона озонатор должен работать непрерывно, хотя бы в режиме с малым выходом озона.

Импульсный озонатор, как было сказано выше, легко управляется блоком БАРЧ и имеет достаточно широкий диапазон изменения выходных характеристик по озону. Например, производительность по озону можно менять от 0,176 до 0,453 г/час, а энергетический выход озона – от 13,87 до 55,5 г/кВт.ч. В качестве озонометра был использован озонометр [95], который имеет диапазон измерения концентрации озона в воздухе от 2 до 10 мг/м³ при чувствительности озонометра к озону порядка 0,2 мг/мкА.

Совместное испытание озонатора и озонометра показали его работоспособность в реальных условиях при многоточечном измерении концентраций озона с использованием микропроцессора.

В целом, предложенное устройство обеспечивает автоматический контроль и регулирование концентрации озона в закрытом объеме при высокой чувствительности и надежности результатов измерений, что достигается автоматизацией измерения и регистрацией данных микропроцессором и электронной системой регулирования работой озонатора.

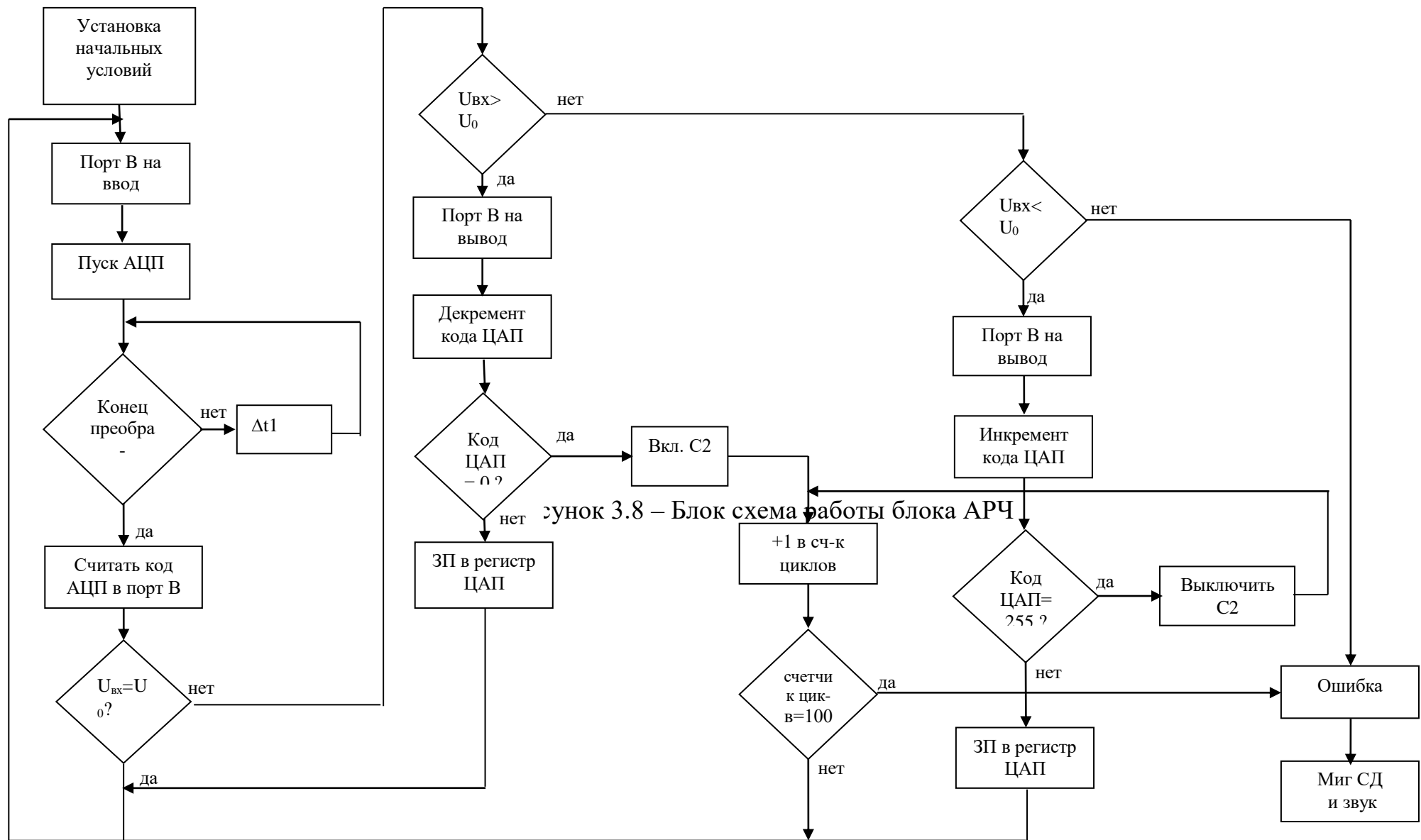
Таким образом, применение озонометра и введение обратной связи между генератором озона и озонометром создает возможность введения автоматического регулирования концентрации озона в овощехранилищах. Для реализации этой идеи служит блок автоматической регулировании частоты (БАРЧ), входным сигналом которого служит меняющийся во времени малый ток измеряемый микроамперметром озонометра, а выходным сигналом является меняющаяся обратно пропорционально измеряемому току выходная частота импульсов, подающиеся на управляющий электрод тиристора емкостного накопителя энергии [94].

Блок-схема автоматического регулирования частоты приведена на рисунках 3.8, 3.9, 3.10.

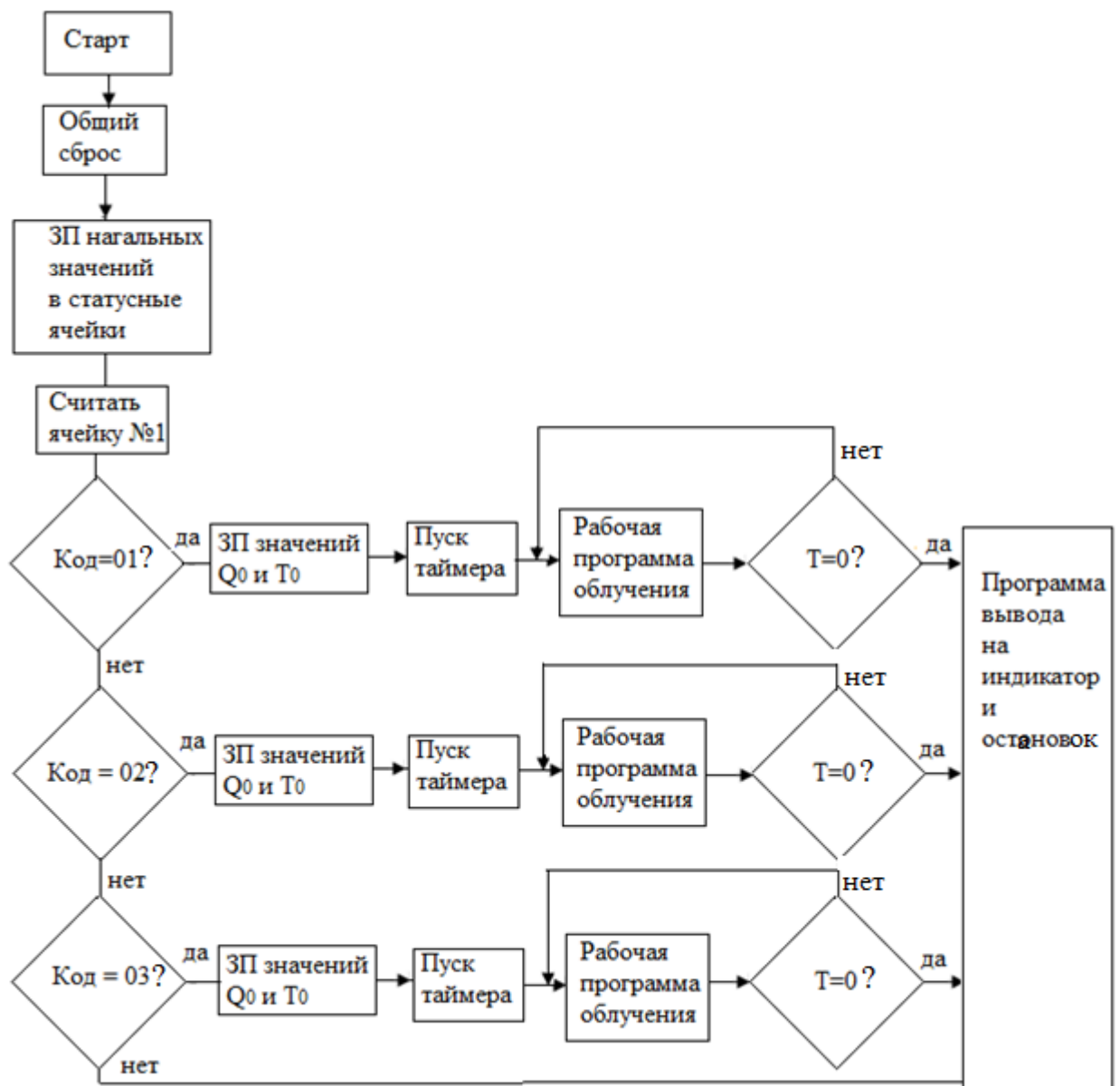
После установки начальных данных в статусные ячейки начинается проверка содержимого ячейки № 1, где задан тип материала (лук, картофель и т.п.) и в зависимости от кода ответвляется в соответствующую рабочую программу.

После этого производится запись в рабочие ячейки требуемых значений концентрации озона и времени облучения, запускается таймер времени облучения, производится переход к рабочей программе озонирования закрытого объема, при выходе из этой программы проверяется значение таймера и при условии, что время озонирования не истекло, возвращается в рабочую программу, а если время истекло, то производится вывод на индикатор и останов программы [96].

Работа рабочей программы начинается с приема выходного сигнала озонметра во внутренний 10-разрядный АЦП оператором “Analog Read”.



сунок 3.8 – Блок схема работы блока АРЧ



Статусная ячейка №1 содержит код 01 – «картофель», код 02 – «морковь», код 03 – «лук».

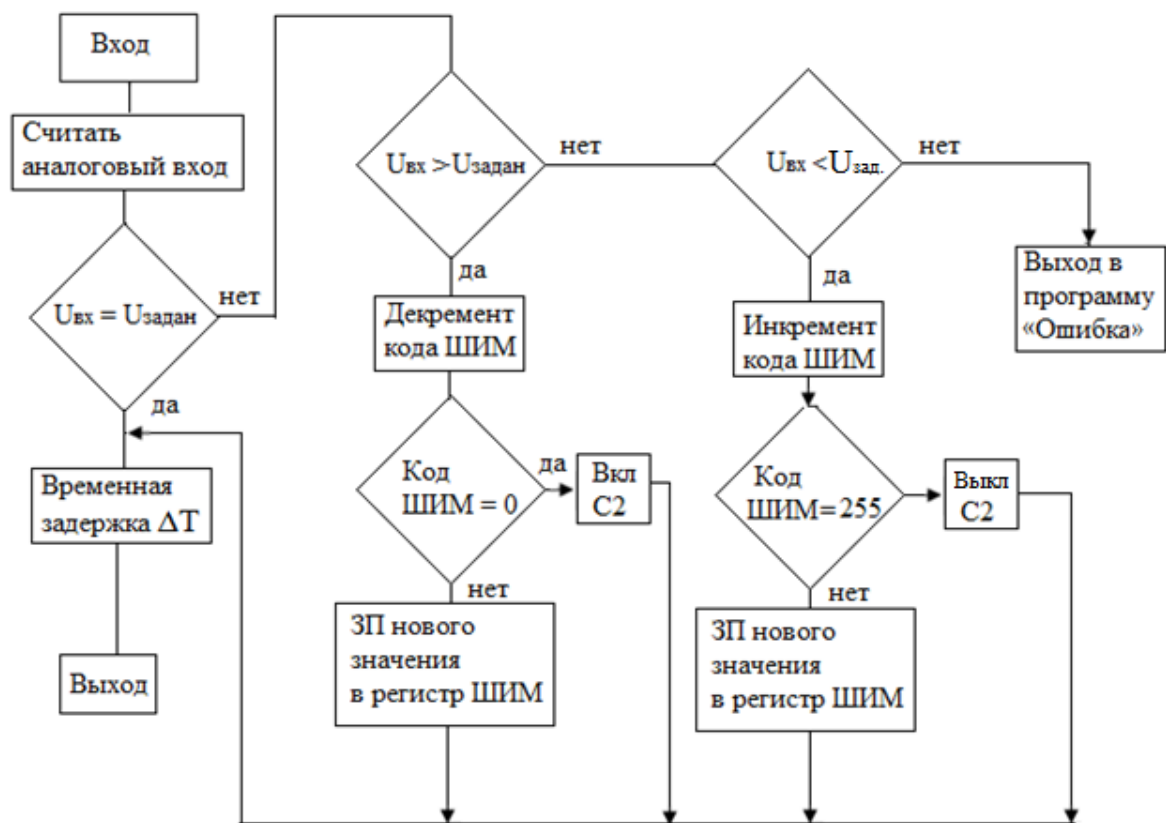
Статусная ячейка №2: задаются начальные значения концентрации озона – Q_0 .

Статусная ячейка №3: задаются времена работы таймера (время обработки продукта) – T_0 .

T – значение программного таймера на МК.

Рисунок 3.9 – Блок схема выполнения основной программы автоматизированной установки озонирования воздуха

Считанный преобразованный код сравнивается с заданным и при условии равенства через элемент задержки выходит из рабочей программы.



C2 – дополнительный конденсатор, управляется портом D4 – МК через герконовое реле.

Рисунок 3.10 – Рабочая программа озонирования закрытого объема

Если принятое напряжение больше заданного U_0 тогда порт-регистр ШИМ переводится в режим вывода, через него код выходного ЦАП (ЦАП- это порт –регистр ШИМ+ ФНЧ) уменьшается на «-1» и проверяется не дошел ли этот код до «0»? Если код ЦАП еще не «0», тогда этот код записывается в регистр ШИМ, тем самым изменяя выходное аналоговое напряжение, что соответственно влияет на частоту генератора ГУН и программа возвращается к следующему шагу, т.е. к проверке таймера.

Если код ЦАП дошел до «0», но не достиг равенства реального и заданного напряжения, значит надо менять диапазон частот, и МК подключает к ГУН дополнительную емкость C2. В случае если напряжение с озонметра меньше заданного, тогда порт ШИМ тоже переводится в режим ввода и через него происходит увеличение на 1 кода ЦАП, после чего происходит проверка кода ЦАП на максимум, и если этот код меньше 255 (максимум байта ШИМ) тогда производится запись в регистр ШИМ и возврат в начало. Если код ЦАП достиг максимума, тогда МК отключает дополнительную емкость путем сброса D4 в «0».

Из блок-схемы алгоритма рабочей программы наглядно видны все процессы происходящие внутри МК управления. Начальными константами служит: а) задание f_{cp} для определенного вида концентрации озона и

соответствующее ему U_{cp} , подаваемого на регистр ШИМ; б) сброс в «0» всех внешних регистров БАРЧ.

3.5 Выводы по разделу

1. Дано обоснование представления технологического процесса озонирования при хранении сельскохозяйственной продукции в качестве нестационарного динамического многомерного многосвязного объекта управления с входами p и выходами q , для которого предложено аналитическое описание в виде системы из q разностных уравнений, линейных относительно коэффициентов.

2. Получены адаптивные прогнозирующие модели технологического процесса озонирования при хранении сельскохозяйственной продукции, а также условия идентифицируемости объекта управления, с учетом которого синтезирован алгоритм идентификации. Обоснован выбор проекционного алгоритма идентификации Качмажа.

3. Показано, что в среднем величина ошибки идентификации непрерывно уменьшается в течение времени обучения. Скорость уменьшения дисперсии ошибки оценки коэффициентов объекта определяется размерностью системы i ($i = m + n$) и обратно пропорциональна размерности системы. Выбран критерий останова системы параметрической идентификации.

4. Выполнен синтез адаптивной системы управления ТП озонирования в виде двухконтурная адаптивная система управления ТП с нестационарными параметрами, в которой к первому контуру адаптации (на базе адаптивной системы с идентификатором (АСИ)) добавлен второй контур адаптации, включающий группу лиц, принимающих решение (ЛПР), которыми являются эксперты технологи, вырабатывающие усредненное решение по качеству производимого продукта.

5. Разработан алгоритм синтеза адаптивной прогнозирующей модели нестационарного динамической системы управления ТП озонирования. С целью оценки устойчивости адаптивной системы с идентификатором воспользуемся алгебраическим критерием устойчивости Шур-Кона для дискретных систем.

6. Осуществлен синтез оптимального регулятора адаптивной систем управления ТП озонирования, порождающего локально-оптимальные управляющие воздействия на каждом из рассматриваемых интервалов времени ТП озонирования.

7. Разработано устройство на основе микроконтроллера для автоматического контроля и регулирования концентраций озона в закрытом объеме, содержащее коронирующие иглы, выполненные в виде игл на сетках, направленных в противоположные стороны и подсоединенных к разным полюсам источника питания, а внешние электроды расположены напротив коронирующих игл.

8. Результаты исследований представленных в третьем разделе, опубликованы нами в [44, 94, 96, 97, 99].

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ ОЗОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

4.1 Экспериментальное определение производительности и удельного энергетического выхода озона

При разработке озонаторов главным образом обращают внимание на его энергетический выход озона, который определяет количество озона, полученное на единицу затрачиваемой энергии ($г/кВт\cdotч$). Именно эта величина служит основным критерием сравнения озонаторов, работающих при различных формах газового разряда. Другой важной характеристикой работающих озонаторов является суммарная производительность по озону ($г/ч$), которая выбирается из требования объекта и объёма обрабатываемого продукта. Выбор формы электрического разряда для получения озона, также зависит от этих двух параметров озонатора, т.е. чем больше его суммарная производительность по озону, тем выше требование к энергетическому выходу отдельных озонаторных ячеек [72].

Ценность и достоверность полученных результатов определяются в конечном итоге правильностью выбранной методики исследования и точностью измерительных приборов. В связи с этим для выполнения целого комплекса измерения был разработан ряд экспериментальных установок и измерительных устройств, электронная аппаратура и конструкции разрядных камер, которые позволили провести систематические исследования характеристик униполярной короны на МП при различных давлениях атмосферного воздуха [45].

Начальное напряжение зажигания коронного разряда определяется по показанию микроамперметра МЗ1/А с ценой деления $1,5\cdot 10^{-8}А/дел.$ Сначала напряжение питания повышается до такого значения, когда световой указатель микроамперметра отклоняется на всю шкалу, т.е. на $0,075мкА$. После этого напряжение снижается до исчезновения тока короны и отмечается значение начального напряжения. В отдельных случаях с целью повышения чувствительности измерения используется цифровой вольтметр В7-23, измеряющий падение напряжения на нагрузочном сопротивлении $1кОм$ в цепи разряда. В микровольтовом диапазоне легко достигается точность измерения $10^{-10}А/дел.$ Для питания разрядных камер использованы высоковольтные стабилизированные источники напряжения типов ВС-22, ВС-23 и УПУ-1М, обеспечивающие при $4-10кВ$ стабильность выходного напряжения не хуже $\pm (0,01 - 0,5)\%$. Для повышения точности измерения напряжения используется омический шунт, составленный из микропроволочных сопротивлений типа МВСГ (класс точности 0,05). При измерении напряжения в делителе с помощью цифровых вольтметров В7-23 или В3-38 погрешность не превышает $\pm 0,1\%$ [45].

Существенная неоднородность электрического поля вызывает резко различный характер протекания тока коронного разряда во внутренней и внешней областях короны. При этом внутренний коронирующий слой является

ключевым, определяющим все характерные особенности разряда в целом. Ионизационные процессы в коронном разряде протекают в коронирующем слое вблизи электрода с малым радиусом кривизны. Присутствие измерительного зонда в этой области в значительной степени нарушает распределение напряжённости поля и объёмных зарядов. Поэтому о разрядных параметрах коронирующего слоя обычно судят по данным внешних электрических характеристик, начальной напряжённости поля или по структуре свечения короны [44].

Одним из возможных подходов к исследованию коронного разряда является изучение особенностей его характеристик при приложении к разрядному промежутку одновременно высоковольтного постоянного и малого по величине ВЧ переменного напряжения. Зондирование переменным напряжением высокой частоты с малой амплитудой позволяет исследовать динамические характеристики коронирующего промежутка и в частности, определить зависимость ВЧ-проводимости коронного разряда от частоты.

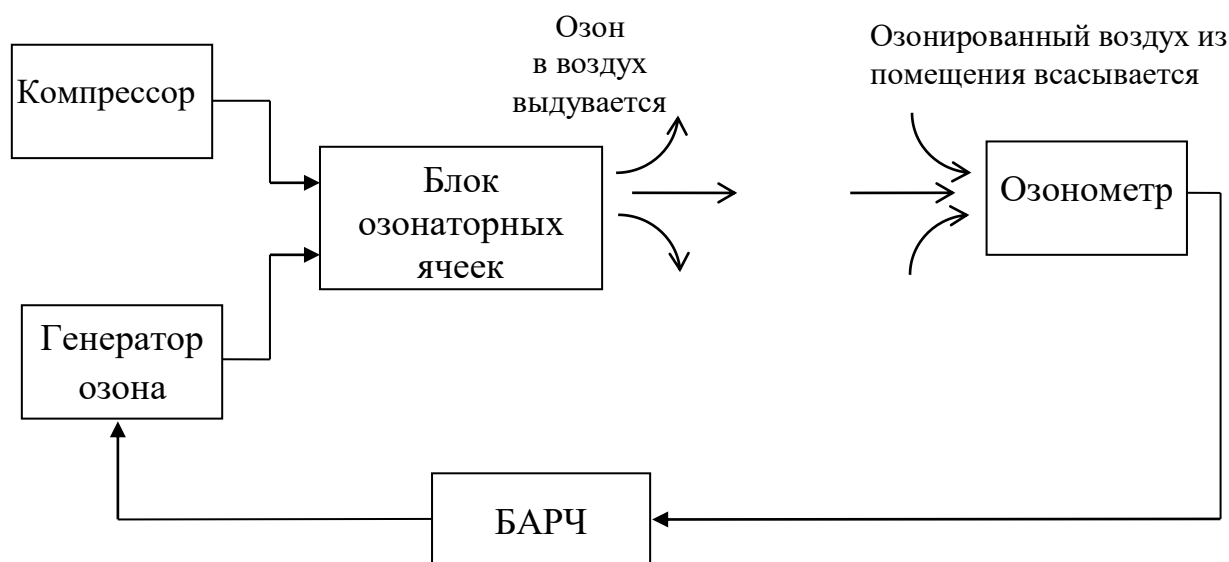
В этом случае от генератора (Г) типа ГС-100И подаётся на разрядную камеру переменное синусоидальное напряжение с регулируемой частотой от 200Гц до 1,5МГц. Высокое напряжение в разрядную камеру подаётся от высоковольтного источника (В). Выходное переменное напряжение измеряется на нагрузке R_l (1кОм) с помощью следующих измерительных приборов: осциллографа (О) ДЭСО-2, лампового вольтметра (ЛВ) ВЗ-2А, измерителя частоты (Ч) ЧЗ-22.

Таким образом, приведенный выше комплекс электронных измерительных приборов позволяет проводить измерения широкого спектра электрических величин: начальную напряжённость короны, вольтамперную характеристику и значения тока разряда в виде высоковольтных импульсов, а также обеспечивает измерение длительности фронта импульсов и их частоту.

Для проведения исследований параметров озонирования воздуха в производственных помещениях был разработан экспериментальный стенд, структурная схема которого представлена на рисунке 4.1.

Источник высоковольтных импульсов напряжения (ИВИН), разработанный в разделе 2.3, предназначен для выработки высоковольтных импульсов с амплитудой до 3 кВ, длительностью порядка 75мкс и частотой до 4 кГц. Примечательной особенностью блока ИВИН является то, что он обеспечивает плавное изменение амплитуды импульсов и их частоту. Изменение их значения ведет к изменению тока разряда, прямо пропорционального концентрации озона на выходе коронно-разрядных ячеек. Наиболее удобным и легко изменяемым параметром является частота импульсов [99].

Блок БАРЧ в соответствии с напряжением от озонметра вырабатывает регулирующий сигнал, который подается в блок ИВИН для изменения значения частоты импульсов в ту или в другую сторону.



1. Источник высоковольтных импульсов напряжения – генератор озона;
2. Коронно-разрядные ячейки, вырабатывающие озон;
3. Компрессор для выдувания озона из озонаторных ячеек;
4. Озонометр;
5. Экспериментальный образец блока автоматического регулирования концентрации озона, иначе блок автоматического регулирования частоты (БАРЧ) генератора.

Рисунок 4.1 – Общая структурная технологическая схема озонирования воздуха в производственных помещениях

На основе ИВИН, коронно-разрядных ячеек и блока БАРЧ разработан опытный образец озонатора ОВИ-1, имеющий следующие технические характеристики:

Напряжение электросети	220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность	0,15 кВт
Обрабатываемая кубатура	до 50 куб.м
Время однократного действия	от 10 минут
Габариты	240x210x110 мм
Масса	4,5 кг

В экспериментальном стенде используется озонатор ОВИ-1 разработанный, в разделе 2.3 настоящей диссертации на основе коронного разряда, что позволяет применить один источник питания высоковольтного напряжения.

Внешний вид экспериментального стенда показан на рисунке 4.2 [44].

Техническое применение коронного разряда основано на зависимости ВАХ от внешних условий и других параметров разрядного промежутка. Вольтамперная характеристика важна, например, при выборе электрических параметров электрофильтра или при расчёте потери мощности из-за короны на линиях электропередач и т.д. ВАХ широко используется для оценки

эффективности различных коронирующих систем в аппаратах электронно-ионной технологии [45].



Рисунок 4.2 – Экспериментальный стенд

Для озонаторов на коронном разряде также первоначально определяют вольтамперные характеристики (ВАХ) озонирующего элемента, а затем только приступают к измерению других параметров озонатора.

В таблице 4.1 представлены ВАХ коронно-разрядной системы в зависимости от количества коронирующих трубок.

Таблица 4.1 – ВАХ коронно-разрядной системы в зависимости от количества трубок

$U_{\text{лагр}}, \text{В}$		0	20	40	60	80	100	120	150
1 Трубка	$U_1, \text{В}$	0	1	2,2	3,8	5	5,2	5,80	6,4
	$I_{1к}, \text{мкА}$	0	9	20	34	45	47,27	52,72	58,18
2 Трубки	$U_2, \text{В}$	0	0,8	3	4,8	6,40	8	10	12
	$I_{2к}, \text{мкА}$	0	7,27	27	43	58	72	90	109
3 Трубки	$U_3, \text{В}$	0	1	3,2	5	7	8,2	10,3	12,5
	$I_{3к}, \text{мкА}$	0	9	29	45	63	75	93,6	113
4 Трубки	$U_4, \text{В}$	0	1,3	3,7	5,2	7,7	8,2	10,3	12,6
	$I_{4к}, \text{мкА}$	0	11,82	33,64	47,27	70	74,54	93,64	114,54

Для наглядности были построены ВАХ для озонирующих трубок (рисунок 4.3).

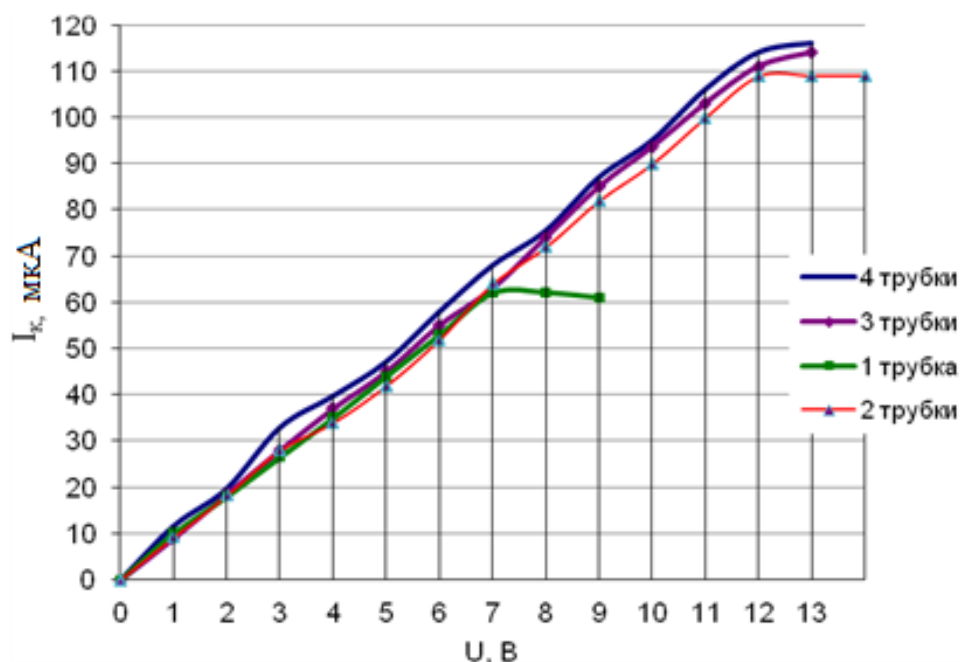
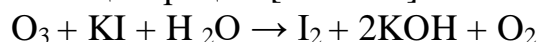


Рисунок 4.3 – ВАХ коронно-разрядной системы в зависимости от количества трубок

При определении ВАХ коронно-разрядных ячеек частота импульсов была постоянной, равной 2 кГц, а нагрузочное сопротивление, на котором измеряется разрядный ток по перепаду напряжения, составило $R=110$ кОм. Зависимости ВАХ позволяют определить диапазон изменения разрядного тока в озонирующих трубках.

Испытания опытного образца ОВИ-1 были выполнены в лабораторных условиях Казахской Республиканской санитарно-эпидемиологической станции (КРСЭС) с целью определения производительности и удельного энергетического выхода озона по йодометрическому методу (рисунок 4.4) [107].

При взаимодействии озона с йодистым калием (водный раствор) выделяется свободный йод, который определяется титрованием раствора тиосульфатом известной концентрации [103-105].



Озоно-кислородная (или озоновоздушная) смесь барботирована через аналитический раствор до появления слабой светло-желтой окраски: признак выделившегося йода. Реальное время анализа находилось в пределах до 1 часа; скорость потока не превышала 200-250 л/ч. С целью исключения проскока озона, использованы последовательно соединенные два барботера. Проозонированный раствор выдержан перед титрованием в темном месте ~10

мин. Перед началом титрования раствор йодистого калия подкислен 5 мл разбавленной (1:5) серной кислотой.

В конце титрования в раствор добавлен крахмал (2 мл), и раствор приобрел синюю окраску. Тиосульфат добавлен в раствор до обесцвечивания. Нейтрализация йода осуществлена по реакции

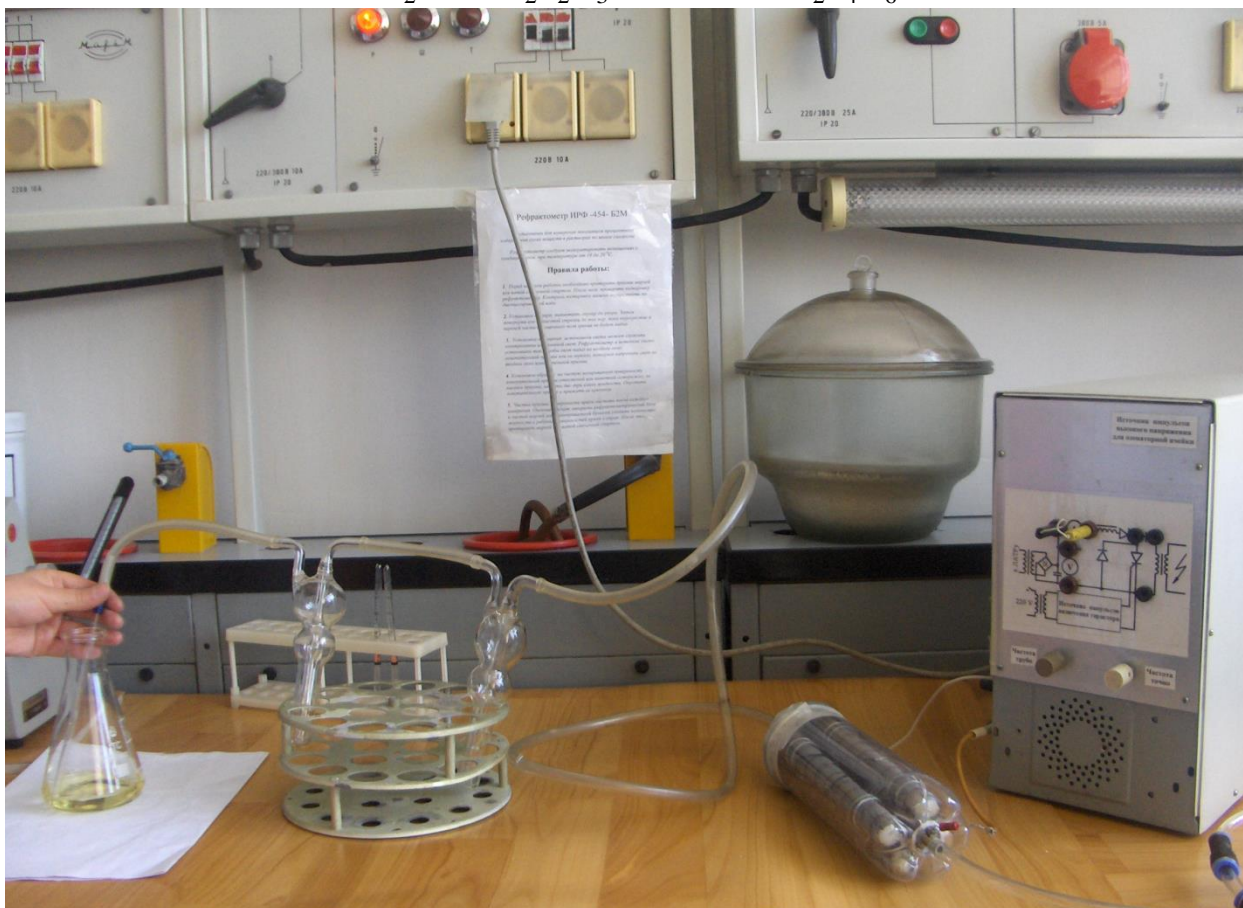
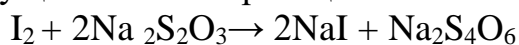


Рисунок 4.4 – Размещение экспериментального стенда в лаборатории Казахской Республиканской санитарно-эпидемиологической станции [107]

Производительность озонатора по озону в 1л воздуха определялась по формуле:

$$m = \frac{V \cdot n \cdot 1000 \cdot 24}{100} \quad (\text{мг/л}),$$

где V – объем $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, количество миллилитров тиосульфата, израсходованное на титрование; n – нормальность раствора тиосульфата $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (тиосульфата натрия = 0,1).

Зависимость концентраций озона от напряжения короны представлена на рисунке 4.5, зависимость производительности озона от частоты – на рисунке 4.6, зависимость энергетического выхода озона от частоты – 4.7, зависимость производительности озона от тока короны – 4.8, зависимость энергетического выхода озона от тока короны – 4.9.

Таблица 4.2 – Зависимость концентрации озона от напряжения

№	U _{ЛАТР} , В	f, Гц	v, мл	t, мин	V, Na ₂ S ₂ O ₃	m, мг/л; прокачка 35л за 10 мин	O ₃ , г/ч	O ₃ , г/кВтч
1	80	2000	100	10	0,4	9,6	0,201	56,81
2	100	2000	100	10	0,6	14,4	0,252	54,54
3	120	2000	100	10	0,8	19,2	0,403	48,54
4	140	2000	100	10	1,1	26,4	0,554	47,03
5	150	2000	100	10	1,2	28,8	0,705	44,9

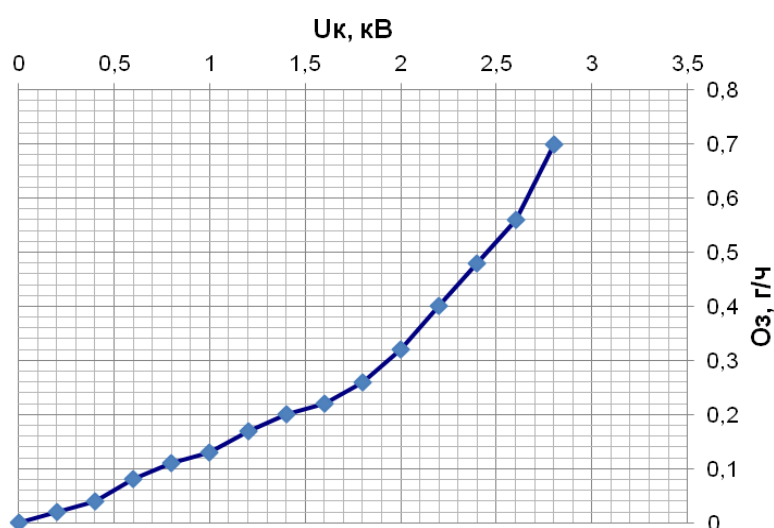


Рисунок 4.5 – Зависимость концентраций озона от напряжения короны

Таблица 4.3 – Зависимость концентраций озона от частоты импульсов

№	f, Гц	U _{ЛАТР} , В	v, мл	t, мин	V, Na ₂ S ₂ O ₃	m, мг/л; прокачка 35л за 10 мин	O ₃ , г/ч	O ₃ , г/кВтч
1	150	125	100	10	0,35	8,4	0,176	–
2	1000	125	100	10	0,5	12	0,252	55,5
3	2000	125	100	10	0,9	21,6	0,453	49,8
4	3000	125	100	10	0,85	20,4	0,428	31,42
5	4000	125	100	10	0,5	12	0,252	13,87

O₃, г/ч – производительность озона, O₃, г/кВтч – удельный энергетический выход озонатора.

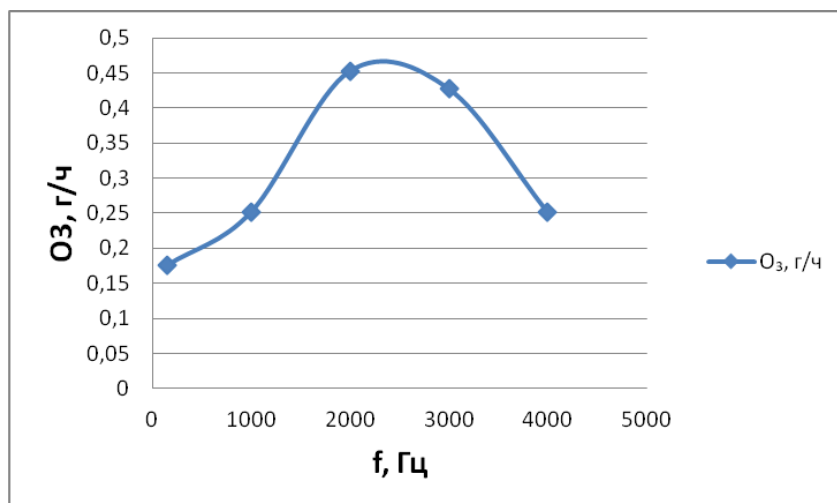


Рисунок 4.6 – Зависимость производительности озона от частоты

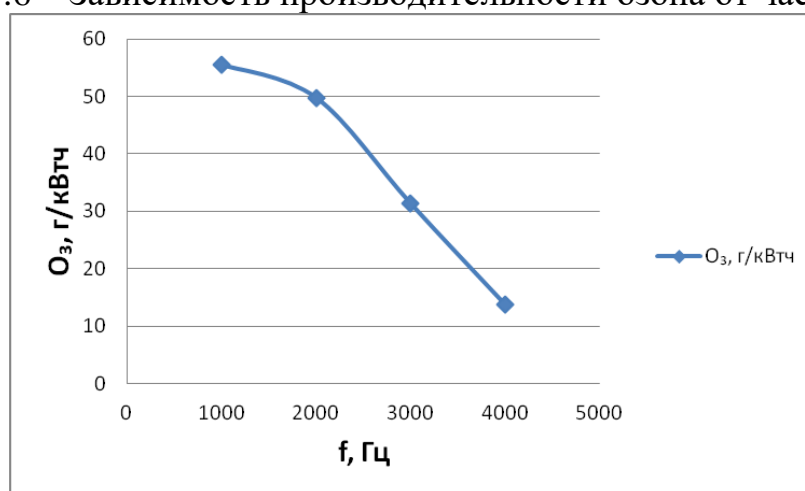


Рисунок 4.7 – Зависимость энергетического выхода озона от частоты

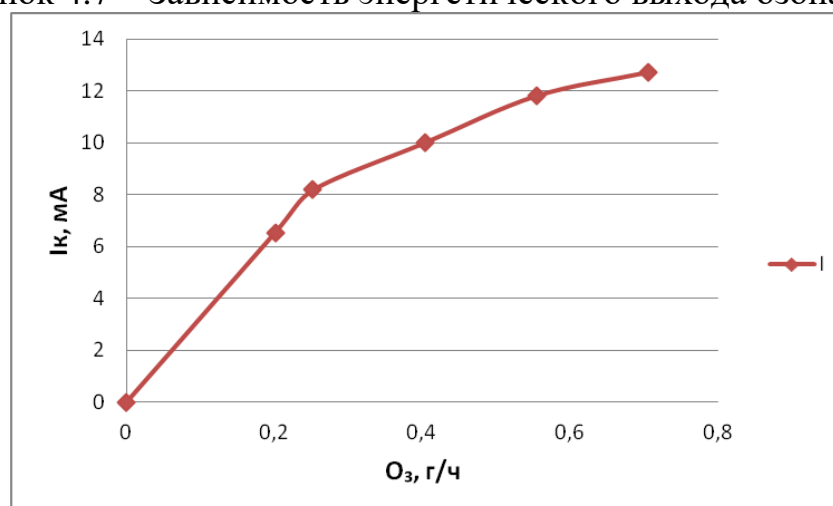


Рисунок 4.8 – Зависимость производительности озона от тока короны

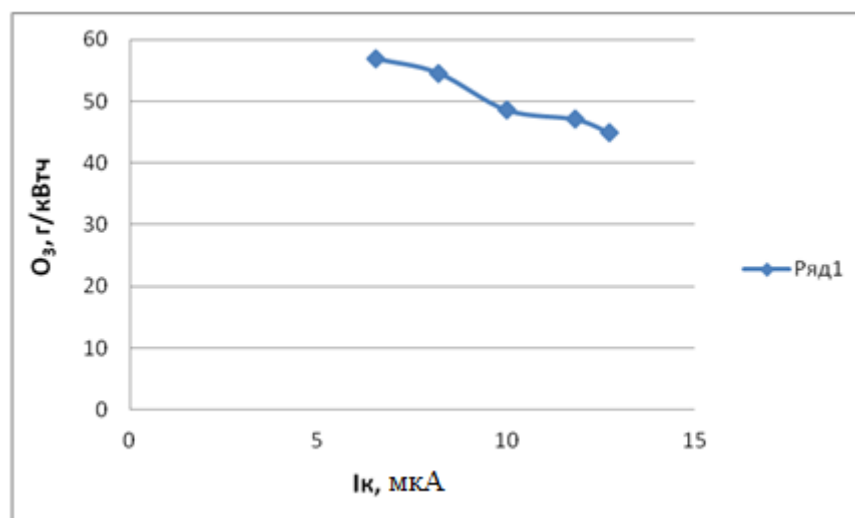


Рисунок 4.9 – Зависимость энергетического выхода озона от тока короны

Характеристики озонатора приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Характеристики озонатора

U _{латр} , В	20	40	60	80	100	120	140	150
U _к , кВ	0,26	0,78	1,04	1,44	1,8	2,2	2,6	2,8
I _к , мкА	1,18	3,54	4,73	6,54	8,18	10	11,81	12,72
Q, мкК	0,44	1,32	1,77	2,45	3,06	3,75	4,42	4,77
W, мДж	0,25	0,51	0,92	1,76	2,75	4,12	5,74	6,67
P, Вт	0,5	1,02	1,84	3,52	5,51	8,24	11,48	13,34
O ₃ , г/ч				0,201	0,252	0,403	0,554	0,705
O ₃ , г/кВтч				56,81	54,54	48,54	47,03	44,90
V _{Na2S2O3}				0,4	0,6	0,8	1,1	1,2
m				9,6	14,4	19,2	26,4	28,8

$Q = i \cdot t_u / 2$, Кулон. $t_u = 75$ мкс. Энергия импульса $W = Q \cdot U / 2$, Дж. $P = W \cdot f$, Вт

Для сравнения результатов измерения иодометрическим методом, были произведены испытания озонатора ОВИ-1 с применением индикаторных трубок ТИ-О₃ и сильфонного аспиратора АМ-0059

Полученные результаты сведены в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 – Массовая концентрация озона на выходе озонатора

№ опыта	U _{латр}	t, с	V, мл	N	A _{O₃} , мг/м ³
1	100	2	200	2	3,2
2	120	2	200	2	4
3	140	2	200	2	6,3
4	150	2	200	2	7,8

Результаты, измеренные по данному методу при измерениях концентраций озона на выходе озонатора ОВИ-1, несколько занижены по сравнению с данными, полученными йодометрическим методом.

4.2 Оценка структуры и параметров адаптивной прогнозирующей модели ТП озонирования при использовании активной идентификации

Идентификация нестационарного динамического объекта в общем случае состоит в определении структуры и параметров математических моделей по наблюдаемым данным – входному воздействию и выходной величине.

Сначала осуществляется структурная идентификация (выбор структуры модели на основе анализа априорной информации об объекте), далее – параметрическая идентификация (оценивание параметров модели).

Для оценивания параметров математической модели можно использовать МНК и его вариации – рекуррентный (РМНК), расширенный рекуррентный (РРМНК) и т.д.

МНК является алгоритмом идентификации, при котором функции потерь представляет собой квадрат невязки:

$$F(e(N)) = e^2(N) = (y(N) - \hat{y}(N))^2.$$

Рассмотрим применение МНК на примере идентификации линейного одномерного динамического объекта второго порядка. В качестве настраиваемой модели используем динамическую модель второго порядка:

$$y(N) = -a_1y(N-1) - a_2y(N-2) + b_1u(N-1) + b_2u(N-2) + v(N). \quad (4.1)$$

Выбор динамической модели в качестве настраиваемой модели для реализации МНК обоснован при малых отношениях интенсивности шума к полезному сигналу [34].

При расчете прогнозируемого значения выходной величины $\hat{y}(N)$ с помощью разностного уравнения (4.1) полагаем $v(N) \rightarrow 0$. Исходя из этого уравнение (4.1) примет вид

$$\hat{y}(N) = -a_1y(N-1) - a_2y(N-2) + b_1u(N-1) + b_2u(N-2). \quad (4.2)$$

Невязка, квадратичная функция потерь и эмпирические средние потери для рассматриваемого случая определяются следующим образом:

$$c(N) = y(N) - \hat{y}(N) + a_1y(N-1) + a_2y(N-2) - b_1u(N-1) - b_2u(N-2); \quad (4.3)$$

$$c^2(N) = (y(N) + a_1y(N-1) + a_2y(N-2) - b_1u(N-1) - b_2u(N-2))^2 \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned}
S(y, u, a_1, a_2, b_1, b_2, N_0) &= \\
&= \frac{1}{N_0} \sum_{i=8}^{N_0} (y(N) + a_1 y(N-1) + a_2 y(N-2) - b_1 u(N-1) \\
&\quad - b_2 u(N-2))^2
\end{aligned} \tag{4.5}$$

где N_0 – размер выборки.

В данном случае задача идентификации сводится к нахождению таких оценок коэффициентов $a_1^0, a_2^0, b_1^0, b_2^0$, при которых функционал (4.5) достигает минимума

$$a_1^0, a_2^0, b_1^0, b_2^0 = \mathop{\text{arg}} \left\{ \min_{a_1, a_2, b_1, b_2} S(y, u, a_1, a_2, b_1, b_2, N) \right\} \tag{4.6}$$

Нахождение оценок $a_1^0, a_2^0, b_1^0, b_2^0$, осуществляется из необходимого условия экстремума $S^2(y, u, a_1^0, a_2^0, b_1^0, b_2^0, N)$, которое представляет собой равенство производных функционала (4.5) нулю (по параметрам $a_1^0, a_2^0, b_1^0, b_2^0$).

Вычислим эти производные, приравниваем их к нулю и составим систему линейных уравнений:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial S}{\partial a_1} &= \frac{2}{N_0} \sum_{i=8}^{N_0} (y(i) + a_1 y(i-1) + a_2 y(i-2) - b_1 u(i-1) - b_2 u(i-2)) y(i-1) = 0; \\
\frac{\partial S}{\partial a_2} &= \frac{2}{N_0} \sum_{i=8}^{N_0} (y(i) + a_1 y(i-1) + a_2 y(i-2) - b_1 u(i-1) - b_2 u(i-2)) y(i-2) = 0; \\
\frac{\partial S}{\partial b_1} &= \frac{2}{N_0} \sum_{i=8}^{N_0} (y(i) + a_1 y(i-1) + a_2 y(i-2) - b_1 u(i-1) - b_2 u(i-2)) (-u(i)) = 0; \\
\frac{\partial S}{\partial b_2} &= \frac{2}{N_0} \sum_{i=8}^{N_0} (y(i) + a_1 y(i-1) + a_2 y(i-2) - b_1 u(i-1) - b_2 u(i-2)) (-u(i-1)) = 0;
\end{aligned} \tag{4.7}$$

Решение системы уравнений (4.7) запишем в матричной форме:

$$\mathbf{RK} = \mathbf{F}, \tag{4.8}$$

где \mathbf{R} – матрица, имеющая следующий вид:

$$\begin{pmatrix}
\sum_{i=8}^M y^2(i-1) & \sum_{i=8}^M y(i-2)y(i-1) & -\sum_{i=8}^M (i-1)y(i-1) & -\sum_{i=8}^M u(i-2)y(i-1) \\
\sum_{i=8}^M y(i-1)u(i-2) & \sum_{i=8}^M y^2(i-2) & -\sum_{i=8}^M u(i-1)y(i-2) & \sum_{i=8}^M u(i-2)y(i-2) \\
-\sum_{i=8}^M y(i-1)a(i-1) & -\sum_{i=8}^M y(i-2)a(i-1) & \sum_{i=8}^M u^2(i-1) & \sum_{i=8}^M u(i-2)u(i-1) \\
-\sum_{i=8}^M y(i-1)u(i-2) & -\sum_{i=8}^M y(i-2)u(i-2) & \sum_{i=8}^M u(i-1)a(i-2) & \sum_{i=8}^M u^2(i-2)
\end{pmatrix}$$

$$K = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}; F = \begin{pmatrix} -\sum_{i=8}^{N_0} y(i)y(i-1) \\ -\sum_{i=8}^{N_0} y(i)y(i-2) \\ \sum_{i=8}^{N_0} y(i)u(i-1) \\ \sum_{i=8}^{N_0} y(i)u(i-2) \end{pmatrix}.$$

Решением задачи идентификации для рассматриваемого объекта второго порядка является вектор

$$K^0 = \begin{pmatrix} a_1^0 \\ a_2^0 \\ b_1^0 \\ b_2^0 \end{pmatrix},$$

который определяется следующим образом:

$$K^0 = R^{-1}F \quad (4.9)$$

Рассмотрим параметрическую идентификацию линейных нестационарных одномерных динамических объектов для модели ARX произвольного порядка [48, 100]. Введем вектор оцениваемых параметров K и регрессионный вектор $\Phi(N)$ – обобщенным вектор входом с запаздыванием, имеющий размерность $d=m+n$

$$K = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_m \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}, \quad \Phi(N) = \begin{pmatrix} -y(N-1) \\ \vdots \\ -y(n-m) \\ u(N-1) \\ \vdots \\ u(N-n) \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Исходя из этого, формулы для расчета прогнозируемого значения выходной величины объекта, невязки и эмпирических средних потерь (критерий качества идентификации) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{y}(N) &= \Phi^T(N)K \\ c(N) &= y(N) - \Phi^T(N)K \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$S(K, \Phi, N) = \frac{1}{2N_0} \sum_{i=1}^{N_0} (y(i) - \Phi^T(i)K)^2.$$

Продифференцируем (4.11) по векторному аргументу K

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial K} &= \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} (-\Phi(i)(y(i) - \Phi^T(i)K)) = \\ &= \left(\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} \Phi(i)\Phi^T(i) \right) K - \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} \Phi(i)y(i), \end{aligned}$$

приравняем полученное выражение к нулю, получим

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} \Phi(i)\Phi^T(i) \right) K - \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} \Phi(i)y(i) &= 0; \\ \left(\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} \Phi(i)\Phi^T(i) \right) K &= \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} \Phi(i)y(i) \end{aligned}$$

и найдем оценку МНК:

$$K = \left(\sum_{i=1}^{N_0} \Phi(i)\Phi^T(i) \right)^{-1} \sum_{i=1}^{N_0} \Phi(i)y(i) \quad (4.12)$$

Введем матрицу размерности $d \times d$

$$R(N) = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} \Phi(i)\Phi^T(i) \quad (4.13)$$

и вектор-столбец размерности d

$$F(N) = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} \Phi(i)y(i), \quad (4.14)$$

Таким образом, получен алгоритм идентификации по МНК, блок-схема которого представлена на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10 – Блок-схема алгоритма МНК нахождения параметров АПМ

Результатом идентификации (с помощью МНК в режиме off-line) процессов озонной среды на лежкость картофеля и моркови является получение оценок параметров (коэффициентов) настраиваемой математической модели, в качестве которой используется разностное уравнение второго порядка (4.1).

Учитывая поставленные задачи, первым шагом в этом направлении служат исследования влияния озонной среды на условия развития чистых культур микроорганизмов [28, 44, 59, 62, 63, 74]. Полученные результаты помогают выработать стратегию воздействия рассматриваемой среды на процесс хранения плодоовощной продукции. Однако необходимо отметить, что условия эволюции микроорганизмов на питательных средах и в естественных

условиях различны. В этой связи для обоснования и выбора режима обработки мы экспериментально изучили влияние озонной среды на лежкость картофеля и моркови [101].

Для испытания и определения влияния озонозооозушной смеси на лежкость картофеля и моркови проводились исследовательские работы в овощехранилище продовольственного рынка «Арзан» г. Кызылорда. По результатам проведенной работы было видно, что обработка клубней озонозооозушной смесью в 2016-2017 годах (ноябрь - февраль) снизила потери (табл. 4.6).

При этом продукты обрабатывались озонозооозушной смесью с автоматическим контролем концентрации озона в закрытом объеме при постоянстве концентрации озона за установленное время.

Таблица 4.6

Режим	Конц. Оз, мг/м ³	Выход станд. картофеля, %	Потери всего, %	В том числе			
				Сухая гниль, %	Мокрая гниль, %	Ростки, %	Естественная убыль, %
Контроль (картофель)	–	87,0	13,0	2	1	2,5	7,5
Экспозиция (картофель)	3,5	95,0	5,0	0,5	0,1	1,0	3,4
Контроль (морковь)	–	82,5	17,5	3,5	3	3	8
Экспозиция (морковь)	7	90,0	10	2,5	1,5	1	5

Полученные результаты показывают, что обработка клубней картофеля озонозооозушной смесью снизила общие потери до 8%, в том числе убыль массы – до 3,4% в сравнении с контролем. Обработка моркови дали, следующие результаты: общие потери снижены на 7,5 %, в том числе убыль массы 5% в сравнении с контролем. Следовательно, производственные испытания подтвердили основные результаты, полученные при лабораторных испытаниях в холодильных камерах с температурой хранения 2 ÷ 4 °С.

Для снижения потерь при хранении картофеля рекомендуется обрабатывать озонозооозушной смесью с концентрацией 3,5 мг/м³ ежемесячно с экспозицией 36 часов (температура хранения 2 ÷ 4 °С), для моркови обрабатывать озонозооозушной смесью с концентрацией 7 мг/м³ с экспозицией 12 часов 3 дня подряд 1 раз в месяц. При этом должен обеспечиваться автоматический выбор режима озонирования закрытого объема в соответствии обрабатываемому продукту, когда при каждом режиме поддерживается постоянство концентрации озона в объеме за установленное время.

Указанные режимы обеспечивались генератором озона ОВИ-1, по заданной программе. Озонированный воздух продували через воздуходува с помощью компрессора. С помощью блока автоматического регулирования подбиралась концентрация озона и поддерживалась согласно режиму обработки картофеля и моркови в одном уровне длительное время [102].

В случае отклонения уровня наличия микроорганизмов микроконтроллером включался режим адаптивного управления, в результате чего происходила корректировка концентрации озона, приводящая к стабилизации процесса хранения и в итоге к снижению потерь при хранении.

Для подтверждения теоретических результатов осуществлено построение в среде МАТЛАБ модели адаптивного управления процессом хранения при озонировании сельскохозяйственной продукции в закрытом помещении и его визуализация (рис. 4.11а).

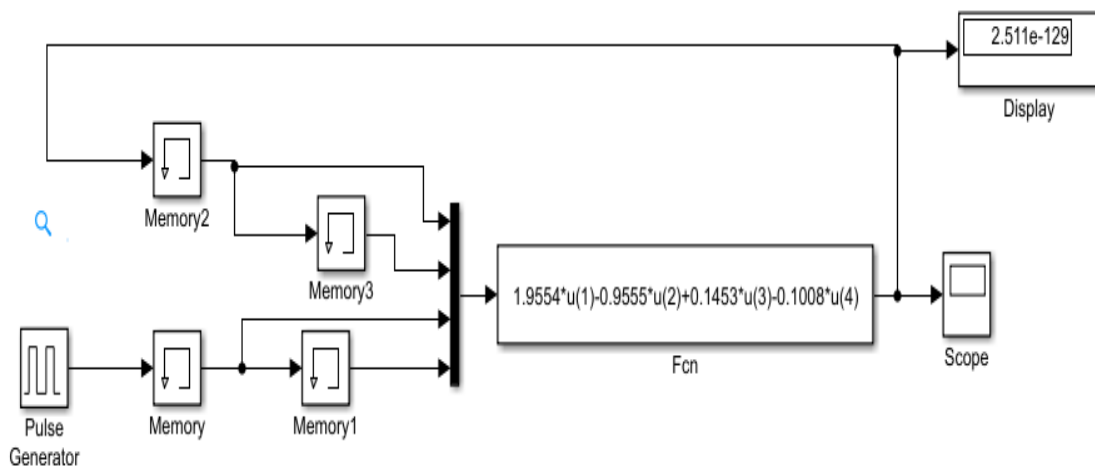


Рисунок 4.11а – Модель адаптивного управления процессом хранения при озонировании сельскохозяйственной продукции в закрытом помещении в среде МАТЛАБ

Вычисленные коэффициенты модели второго порядка (4.1), описывающей процесс озонирования картофеля (рис. 4.11), посредством аппроксимации экспериментальной кривой 1 аппроксимирующей кривой 2, которая и позволяет оценить коэффициенты модели (4.1):

$$a_1=-1,9554; a_2=-0,9555; b_1=0,1453; b_2=0,1008$$

В этом случае модель второго порядка (вида 3.1), описывающая процесс озонирования картофеля в результате идентификации в режиме off-line примет вид

$$y(N) = 1,9554y(N - 1) - 0,9555y(N - 2) + 0,1453u(N - 1) - 0,1008u(N - 2) + v(N), \quad (4.15)$$

где точность представления коэффициентов – до четвертого знака после запятой.

Помеха $v(N)$ рассматривается как несущественная или не поддающаяся прогнозированию и отбрасывается, в результате чего получаем разностное уравнение второго порядка

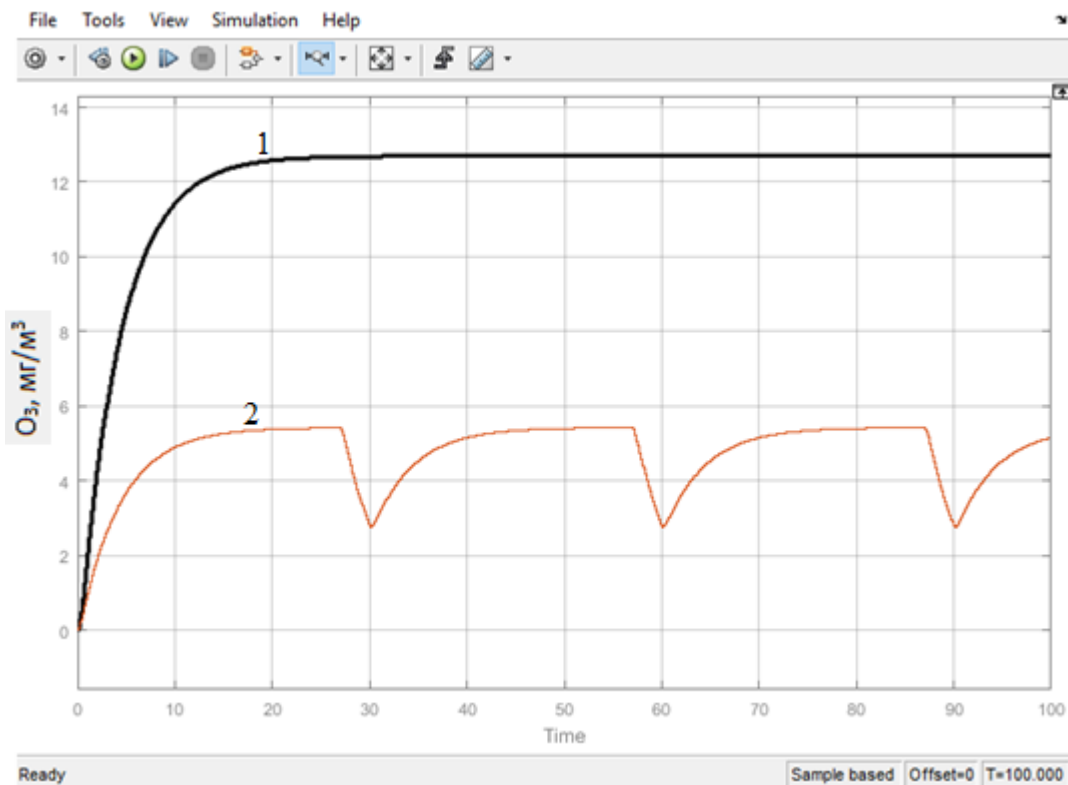


Рисунок 4.11 – Процесс озонирования картофеля
 1 – экспериментальная кривая;
 2 – аппроксимирующая кривая (модель)

$$y(N) = 1,9554y(N - 1) - 0,9555y(N - 2) + 0,1453u(N - 1) - 0,1008u(N - 2), \quad (4.16)$$

По аналогии вычислим коэффициенты разностного уравнения (4.1) описывающего процесс озонирования моркови (рис. 4.12):

$$a_1 = -1,9321; a_2 = 0,9325; b_1 = 0,1541; b_2 = 0,0069.$$

Разностное уравнение второго порядка, описывающее процесс термообработки моркови примет вид:

$$y(N) = 1,9321y(N - 1) - 0,9325y(N - 2) + 0,1541u(N - 1) + 0,0069u(N - 2), \quad (4.17)$$

где точность представления коэффициентов до четвертого знака после запятой.

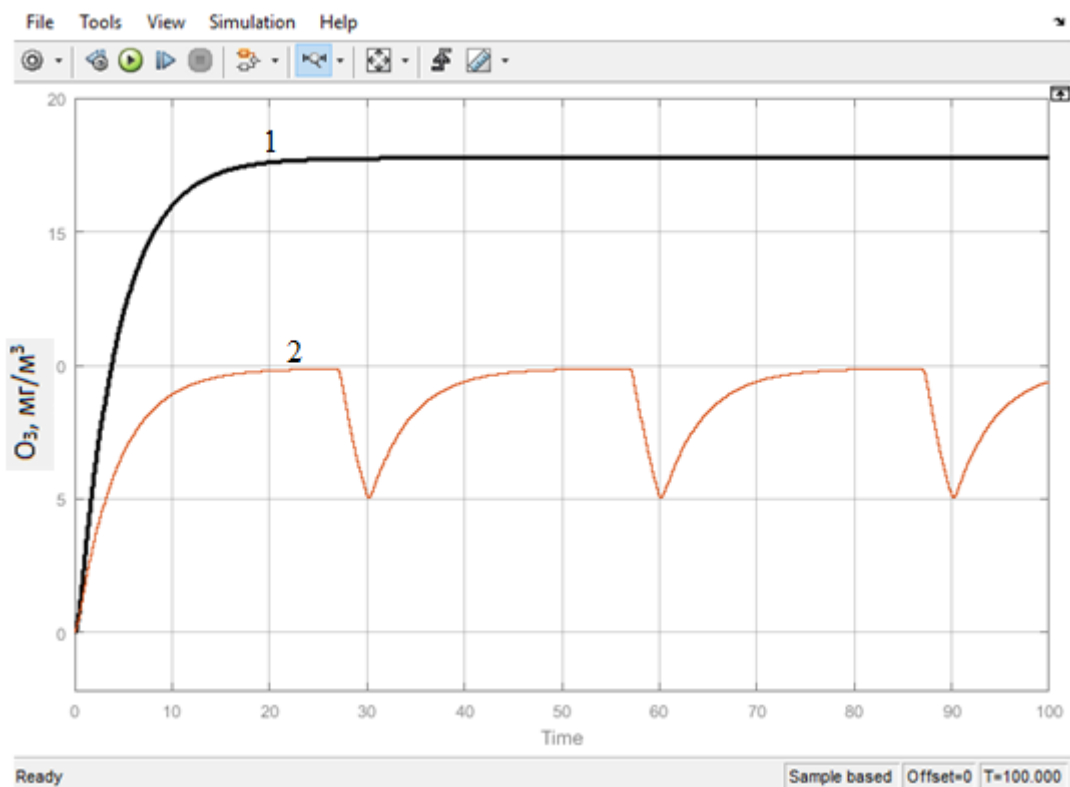


Рисунок 4.12 – Процесс озонирования моркови
 1 – экспериментальная кривая;
 2 – аппроксимирующая кривая (модель)

На рисунках 4.11 и 4.12 для указанных видов хранимой продукции, экстремумы экспериментальных кривых 1 соответствуют моментам выключения и включения озонатора. Кроме того, период повторения процесса озонирования при адаптивном управлении процессом хранения составляет примерно 30 часов, что хорошо согласуется с приведенными в разделе 2.4 данными других исследователей.

Из рисунков 4.11-4.12 видно, что экспериментальные кривые 1 хорошо аппроксимируются моделями 2, представленными разностными уравнениями второго порядка.

Для оценки качества идентификации объектов управления – хранимой продукции, подвергаемых озонированию, воспользуемся критерием качества идентификации (4.11). Для этого можно использовать средний квадрат ошибки прогноза $S^2(R)$ в виде

$$S^2(R) = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^N (T_{э.х} - \hat{T}_{а.к})^2,$$

где $R=\overline{1, N}$ – порядок разностного уравнения; $T_{э.х}$ – экспериментальная переходная характеристика объекта (кривая 2, на рис. 4.11-4.12); $\hat{T}_{а.к}$ – аппроксимирующая кривая (кривая 2 на рис. 4.11-4.12), или в виде несмещенной дисперсии ошибки прогноза:

$$S^2(R) = \frac{1}{N-1} \sum_{h=1}^N T_{э.х} - \hat{T}_{а.к})^2,$$

где

$$D(R) = \lim_{N \rightarrow \infty} S^2(R)$$

Зависимость качества идентификации от порядка аппроксимирующего разностного уравнения, полученные расчетным путем, представлена результатами таблиц 4.6-4.7, а также на рисунках 4.13 и 4.16.

Таблица 4.6 – Результаты идентификации 1 (картофель)

Порядок разностного управления	Критерий качества идентификации (средние потери) S
1	0,5153
2	0,0451
3	0,0235
4	0,0217
5	0,0216

Таблица 4.7 – Результаты идентификации 2 (морковь)

Порядок разностного управления	Критерий качества идентификации (средние потери) S
1	3,6022
2	0,0825
3	0,0676
4	0,0656
5	0,0623

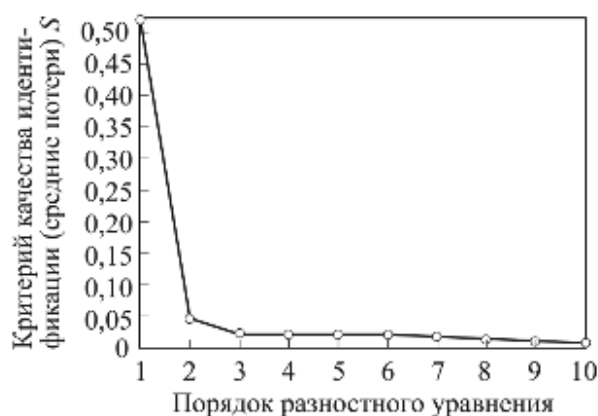


Рисунок 4.13 – Зависимость качества идентификации от порядка аппроксимирующего разностного уравнения (картофель)

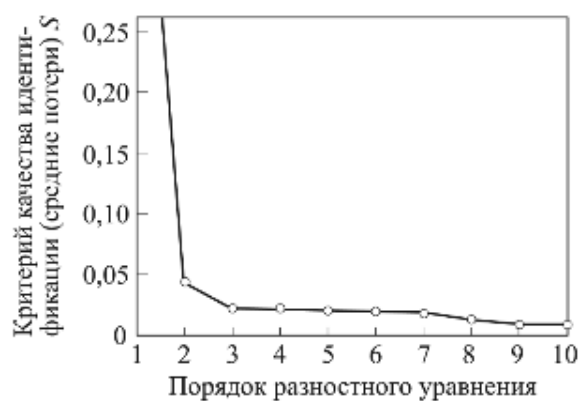


Рисунок 4.14 – Зависимость качества идентификации от порядка аппроксимирующего разностного уравнения в случае озонирования картофеля (фрагмент)



Рисунок 4.15 – Зависимость качества идентификации от порядка аппроксимирующего разностного уравнения (морковь)

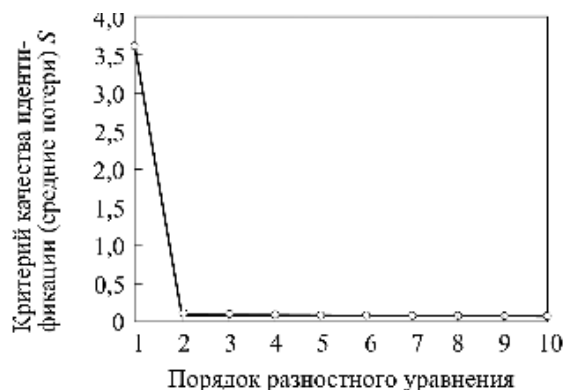


Рисунок 4.16 – Зависимость качества идентификации от порядка аппроксимирующего разностного уравнения в случае озонирования моркови (фрагмент)

Для оценки качества идентификации можно использовать средний квадрат ошибки прогноза $S^2(R)$ в виде

$$S^2(R) = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^N (T_{э.х} - \hat{T}_{а.к})^2,$$

где $R = \overline{1, N}$ – порядок разностного уравнения; $T_{э.х}$ – экспериментальная переходная характеристика объекта (кривая 2, на рис. 4.11-4.12); $\hat{T}_{а.к}$ – аппроксимирующая кривая (кривая 2 на рис. 4.11-4.12), или в виде несмещенной дисперсии ошибки прогноза:

$$S^2(R) = \frac{1}{N-1} \sum_{h=1}^N (T_{э.х} - \hat{T}_{а.к})^2,$$

где

$$D(R) = \lim_{N \rightarrow \infty} S^2(R)$$

Анализ результатов идентификации (см. табл. 4.7-4.8), а также рис. 4.13 и 4.15 показывает, что разностные уравнения второго порядка обеспечивают достаточно высокое качество идентификации. На рис. 4.14 и 4.16 представлены фрагменты, позволяющие наглядно оценить зависимость качества идентификации от порядка аппроксимирующего разностного уравнения.

Совершенно очевидно, что, с увеличением порядка разностного уравнения (выше второго), повышение качества идентификации незначительно.

Анализ моделей (3.15) и (3.17) исследованных видов продукции показывает несущественное различие коэффициентов a_1 и a_2 авторегрессионной части уравнений (во втором знаке после запятой) и существенное различие коэффициентов b_1 и b_2 в регрессионной части уравнений (в первом знаке после запятой).

4.3. Оценка адекватности адаптивной прогнозирующей модели и нестационарного динамического технологического процесса озонирования

Для проверки адекватности АПМ и нестационарного динамического ТП озонирования найдем дисперсию адекватности $S_{ад}^2$ [30]:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (\hat{y}(j) - y(j))^2}{N - i} \quad (4.18)$$

с числом степеней свободы $f = N - i$, где i – число коэффициентов разностного уравнения адаптивной прогнозирующей модели, $i = m + n$. Для проверки воспользуемся статистикой Фишера

$$F = \frac{S_{ад}^2(N)}{D\{y(N)\}} \quad (4.19)$$

Нулевая гипотеза (H_0) формулируется для случая, когда прогнозируемое моделью значение выхода имеет несущественное отличие от измеренного значения выхода объекта:

$$H_0: S_{ад}^2(N) = D\{y(N)\} \quad (4.20)$$

Альтернативная гипотеза (H_1) используется для случая:

$$H_1: S_{ад}^2(N) > D\{y(N)\} \quad (4.21)$$

Статистика F представлена по F -распределению Фишера. Следовательно, если $F \leq F_{1-\alpha}(f_1, f_2)$ модель можно считать адекватной объекту. В противном случае модель не адекватна объекту, где $F_{1-\alpha}(f_1, f_2)$ – квантиль распределения Фишера при доверительной вероятности $P = 1 - \alpha$ и числе степеней свободы $f_1 = N - i$ и $f_2 = N - i$.

Рассмотрим случай применения адаптивной прогнозирующей гетерогенной модели (АПГМ), в которой для повышения точности описания объекта в обобщенный вектор входов включаются результаты химического анализа, а также дополнительно измеряемые входные характеристики обрабатываемых партий продукции. При этом в модели объекта используются только статистически значимые входы (процедура проверки статистической значимости входов базируется на использовании t -статистики Стьюдента) [43, 50].

Результаты химического (лабораторного) анализа, а также результаты дополнительно измеряемых входных характеристик обрабатываемых партий продукции (см. табл. 3.2) рассматриваются как входы адаптивной системы, на базе которых формируется информационная матрица Фишера, используемая для расчета коэффициентов разностного уравнения адаптивной прогнозирующей гетерогенной модели (3.13) на основе МНК или его модификаций. При этом измеряемые входные величины перед использованием в разностном уравнении (3.13) должны быть пронормированы. Диапазон нормирования, как правило, выбирается от -1 до 1 (или от 1 до 0). Чтобы значение нормированной величины не было отрицательным числом, вычисляется ее абсолютное значение.

Нормирование осуществляется по следующему правилу:

$$f_j^*(\cdot) = \left| \frac{\frac{f_j(\cdot)_{\max} - f_j(\cdot)_{\min}}{2} - f_j(\cdot)_T}{f_j(\cdot)_{\max} - f_j(\cdot)_{\min}} \right| \quad (4.22)$$

или принимая $l = f_j(\cdot)_{\max} - f_j(\cdot)_{\min}$, получим:

$$f_j^*(\cdot) = \left| \frac{\frac{l}{2} - f_j(\cdot)_T}{l} \right| \quad (4.23)$$

где $f_j^*(\cdot)$ – нормированное значение измеряемой величины; $f_j(\cdot)_T$ – текущее значение измеряемой величины; $f_j(\cdot)_{\max}$, $f_j(\cdot)_{\min}$ – максимальное и минимальное значения измеряемой величины соответственно.

Уравнение (3.13) с учетом правила нормирования примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \hat{y}(N) = & \hat{a}_1(N)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(N)\hat{y}(N-2) + b_1^* \frac{\frac{l_1}{2} - f_1(\cdot)_T}{l_1} + b_2^* \frac{\frac{l_2}{2} - f_1(\cdot)_T}{l_2} + \dots \\ & + b_n^* \frac{\frac{l_n}{2} - f_1(\cdot)_T}{l_n}, \end{aligned} \quad (4.24)$$

или

$$\hat{y}(N) = \hat{a}_1(N)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(N)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n b_j^* \frac{\frac{l_j}{2} - f_j(\cdot)_T}{l_j} \quad (4.25)$$

С учетом (4.23) выражение (4.25) будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y}(N) = \hat{a}_1(N)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(N)\hat{y}(N-2) + \sum_{j=1}^n b_j^* f_j^*.$$

Для действительных значений выхода объекта уравнение (4.24) примет

вид

$$\begin{aligned} \left(\prod_{j=1}^n l_j \right) \hat{y}(N) = & \\ = & \left(\hat{a}_1(N) \prod_{j=1}^n l_j \right) \hat{y}(n-1) + \left(\hat{a}_2(N) \prod_{j=1}^n l_j \right) \hat{y}(n-2) \\ & + \left(b_1^* \prod_{j=2}^n l_j \right) f_1(\cdot)_{\max} - \left(b_1^* \prod_{j=2}^n l_j \right) f_1(\cdot)_T + \dots + \left(b_n^* \prod_{j=1}^{n-1} l_j \right) f_n(\cdot)_{\max} \\ & - \left(b_n^* \prod_{j=2}^{n-1} l_j \right) f_n(\cdot)_T, \end{aligned}$$

где

$$\hat{b}_1(N) = - \left(b_1^* \prod_{j=2}^{n-1} l_j \right); \hat{b}_2(N) = - \left(b_2^* \prod_{j=1}^{n-1} l_j \right); \dots \hat{b}_n(N) = - \left(b_n^* \prod_{j=2}^{n-1} l_j \right).$$

Применительно к ТП озонирования уравнение модели (4.17) для случая дополнительно измеряемых входных характеристик партий продукции можно записать в векторной форме в следующем виде:

$$\hat{y}(N) = K^T(N-1)\hat{\Phi}(N), \quad (4.25)$$

где

$$\begin{aligned} \hat{\Phi}(N)^T &= (\hat{y}(N-1), \hat{y}(N-2), a_1(N), a_2(N), \dots, a_9(N), x_1(N), x_2(N), \dots, x_7(N)); \\ K^T(N-1) &= (\hat{a}_1(N), \hat{a}_2(N), \hat{b}_1(N), \hat{b}_2(N), \dots, \hat{b}_{16}(N)). \end{aligned}$$

Экспериментально (в режиме off-line) для разностных уравнений второго порядка (4.16) и (4.17) было установлено несущественное различие коэффициентов $a1$ и $a2$ в авторегрессионной части уравнений (во втором знаке после запятой) и существенное различие коэффициентов $b1$ и $b2$ в регрессионной части уравнений (в первом знаке после запятой).

Данный результат исследований позволяет модифицировать (значительно упростить) процедуру идентификации нестационарных коэффициентов объекта озонирования в АСИ, сводя ее только к оценке нестационарных коэффициентов регрессионной части уравнения, т. е. коэффициентов $b_1(N), b_2(N), \dots, b_n(N)$, при измеряемых входах $x_1(N), x_2(N), \dots, x_n(N)$, [47, 51, 52].

Применительно к используемым объектам управления в ТП озонирования обобщим этот эффект на случай разностного уравнения m -го порядка.

В этом случае уравнение для нахождения вектора неизвестных коэффициентов $K^T(N-1)$ по МНК или его модификациям (4.25) примет вид

$$\begin{aligned} \hat{y}(N) &= K^T(N-1)\hat{\Phi}(N), \quad (4.26) \\ \hat{\Phi}(N)^T &= (a_1(N), a_2(N), \dots, a_9(N), x_1(N), x_2(N), \dots, x_7(N)), \\ K^T(N-1) &= (\hat{b}_1(N), \hat{b}_2(N), \dots, \hat{b}_{16}(N)). \end{aligned}$$

Минимизируем сумму:

$$\varphi = \sum_{j=1}^{16} (y(j) - \hat{y}(j))^2 = (y(N) - K^T(N-1)\hat{\Phi}(N))^2 \quad (4.27)$$

Дифференцируя (4.27) по искомому вектору и приравнявая производные $\frac{\partial \varphi}{\partial \hat{b}_j(N)}$ к нулю, получаем линейную систему нормальных уравнений:

$$\hat{\Phi}(N)^T \hat{y}(N) = \hat{\Phi}(N)^T \hat{\Phi}(N) K(N-1) \quad (4.28)$$

С учетом (4) введем для компонент вектора $\hat{\Phi}(N)^T$ следующие обозначения:

$$\hat{\Phi}(N)^T = (\phi_1(N), \phi_2(N), \dots, \phi_9(N), \phi_{10}(N), \phi_{11}(N), \dots, \phi_{16}(N))$$

$$\left\{ \begin{aligned}
& \phi_1(N)\hat{y}(N) = \hat{b}_1(T) \sum_{j=1}^{16} \phi_1^2(N) + \hat{b}_2(T) \sum_{j=1}^{16} \phi_1(N)\phi_2(N) + \dots \\
& \qquad \qquad \qquad + \hat{b}_{16}(T) \sum_{j=1}^{16} \phi_1(N)\phi_{16}(N); \\
& \phi_2(N-1)\hat{y}(N-1) = \hat{b}_1(T) \sum_{j=1}^{16} \phi_1(N-1)\phi_2(N-1) + \\
& + \hat{b}_2(T) \sum_{j=1}^{16} \phi_2^2(N-1) + \dots + \hat{b}_{16}(T) \sum_{j=1}^{16} \phi_2(N-1)\phi_{16}(N-1); \\
& \dots \\
& \phi_{16}(N-16)\hat{y}(N-16) = \hat{b}_1(T) \sum_{j=1}^{16} \phi_1(N-16)\phi_{16}(N-16) + \\
& + \hat{b}_2(T) \sum_{j=1}^{16} \phi_2(N-16)\phi_{16}(N-16) + \dots + \hat{b}_{16}(T) \sum_{j=1}^{16} \phi_{16}^2(N-16).
\end{aligned} \right. \quad (4.29)$$

Обе части полученного уравнения (4.29) умножаем справа на обратную матрицу $\widehat{\Phi}(N)\widehat{\Phi}(N)^T$ – информационную матрицу Фишера (M-1):

$$y(N) \widehat{\Phi}(N)^T (\widehat{\Phi}(N)\widehat{\Phi}(N))^{\sim -1} = K^T(N-1) \widehat{\Phi}(N)\widehat{\Phi}(N) \left(\widehat{\Phi}(N)\widehat{\Phi}(N) \right)^{\sim -1}. \quad (4.30)$$

В (4.30) произведение $\widehat{\Phi}(N)\widehat{\Phi}(N) \left(\widehat{\Phi}(N)\widehat{\Phi}(N) \right)^{\sim -1}$ справа дает единичную матрицу. Исходя из этого (4.30) примет вид

$$K^T(N-1) = y(N) \widehat{\Phi}(N)^T (\widehat{\Phi}(N)\widehat{\Phi}(N))^{\sim -1} \quad (4.31)$$

Уравнение (4.31) используется для вычисления неизвестных коэффициентов (4.26). При рекуррентном оценивании неизвестных коэффициентов уравнения (4.26) воспользуемся РМНК. В этом случае процедура получения оценок коэффициентов (4.26) состоит из следующих шагов [73]:

$$\begin{aligned}
K(N) &= K(N-1) + L(N) \left(y(N) - \widehat{\Phi}^T(N)K(N-1) \right); \\
L(N) &= \frac{P(N-1)K(N)}{\lambda(N) + \widehat{\Phi}^T(N)P(N-1)\widehat{\Phi}(N)}; \\
P(N) &= \left(\frac{P(N-1) - \frac{P(N-1)\widehat{\Phi}(N)\widehat{\Phi}^T(N)P(N-1)}{\lambda(N) + \widehat{\Phi}^T(N)P(N-1)\widehat{\Phi}(N)}}{\lambda(N)} \right),
\end{aligned} \quad (4.32)$$

где $\lambda(N)$ – параметр, определяемый из условия: $\prod_{j=1}^N \lambda(j) = 1$; $P(N)$ – матрица ковариаций, характеризующая разброс во входном векторе $\widehat{\Phi}(N)$.

Найденные оценки $K(N)$ неизвестных коэффициентов объекта (4.32), будучи функциями от случайной величины $y(N)$, также случайные величины. Оценки, полученные по (4.24) или (4.32), являются наиболее вероятными значениями коэффициентов объекта. Кроме того, точность оценок можно характеризовать доверительными интервалами, при построении которых воспользуемся тем, что статистика

$$t = \frac{k_j(N) - h_j(N)}{\sqrt{D\{y(N)\}m_{ii}^{-1}(N)}} \quad (4.33)$$

представлена по t -закону распределения Стьюдента с числом f степеней свободы $D\{y(N)\}$, где $m_{ii}^{-1}(N)$ – i -й диагональный элемент матрицы M^{-1} (информационной матрицы Фишера).

Следовательно, симметричный двусторонний интервал коэффициентов модели $k_j(N)$, при заданной доверительной вероятности $P = 1 - \alpha$ будет

$$P\left(k_j(N) - \Delta k_j(N) \leq h_j(N) \leq k_j(N) + \Delta k_j(N)\right) = 1 - \alpha, \quad (4.34)$$

где $\Delta k_j(N)$, $\sigma(k_j(N))$ – средние квадратические отклонения оценки $k_j(N)$, $\Delta k_j(N) = t_{1-\alpha}(f)\sigma(k_j(N))$; $\sigma(k_j(N)) = \sqrt{D\{y(N)\}m_{ii}^{-1}(N)}$.

Из (4.33) может быть получена допустимая погрешность в виде:

$$\Delta_h = t_{1-\alpha}(f) \sqrt{\frac{D\{y(N)\}}{N}}, \quad (4.35)$$

где Δ_h – погрешность оценки коэффициентов модели объекта; $t_{1-\alpha}(f)$ – значение t -статистики Стьюдента (или квантиль распределения Стьюдента) с числом степеней свободы f [30, 50]. Из (4.35) можно рассчитать объем выборки, который требуется для получения оценок коэффициентов модели с заданной доверительной вероятностью:

$$N = \frac{t_{1-\alpha}^2(f)D\{y(N)\}}{\Delta_h^2} \quad (4.36)$$

Оценим объем выборки для различных значений уровней значимости и (доверительной вероятности $P = 1 - \alpha$).

По результатам испытаний находим максимальное значение дисперсии. Для этого в каждый момент времени, определяемый интервалом квантования, оцениваем значение дисперсии по множеству экспериментальных переходных характеристик. Максимальное значение дисперсии оказывается в области максимального расхождения экспериментальных переходных характеристик. В нашем случае $D\{y(N)\} = 200$.

В таблице 4.6 приведена зависимость объема выборки (N) при различных значениях доверительной вероятности P и доверительного интервала Δ .

Значение t -статистики определяется по таблице интеграла Лапласа (интеграла вероятностей) $P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-t}^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx$, исходя из заданной доверительной вероятности [30].

Таблица 4.6 – Зависимость объема выборки от значений доверительной вероятности P , доверительного интервала и t -статистики

Доверительная вероятность P	Значение t -статистики	Доверительный интервал Δ	Требуемый объем выборки N
0,8	1,29	5	13
0,9	1,65	5	21
0,95	1,96	5	31
0,99	2,58	5	53
0,8	1,29	4	20
0,9	1,65	4	34
0,95	1,96	4	48
0,99	2,58	4	83
0,8	1,29	3	36
0,9	1,65	3	61
0,95	1,96	3	85
0,99	2,58	3	148
0,8	1,29	2	83
0,9	1,65	2	136
0,95	1,96	2	192
0,99	2,58	2	333

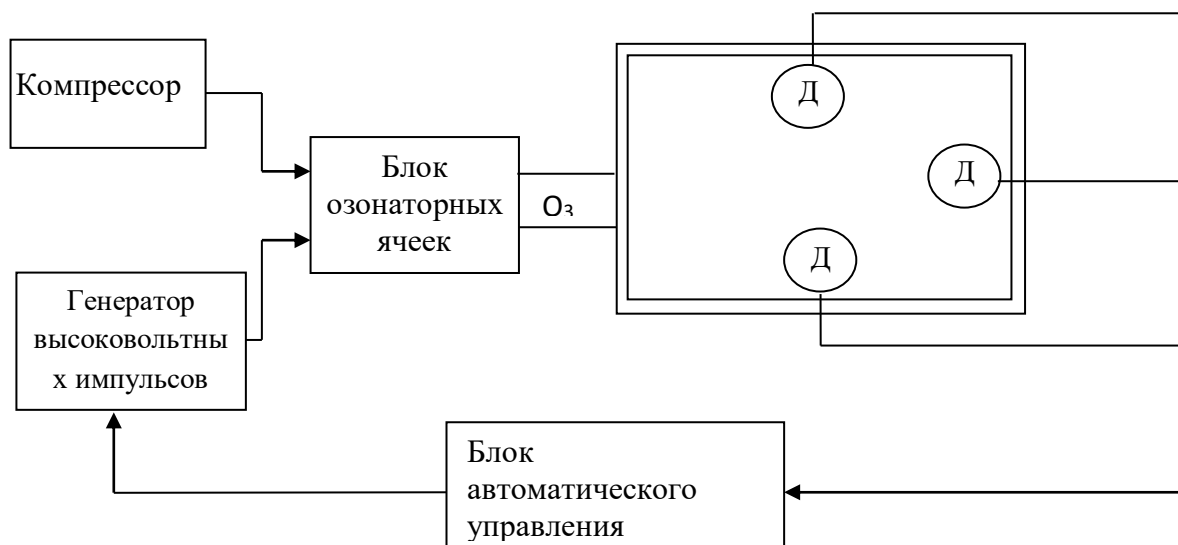


Рисунок 4.17 – Структурная схема автоматизированной установки для озонирования воздуха (Д-датчики)

В качестве датчика концентраций озона может быть использован озонметр типа [95], в котором, влияния степени запыленности воздуха и его атмосферного состояния (температура, давления и влажность) на точность контроля сведены к минимуму.

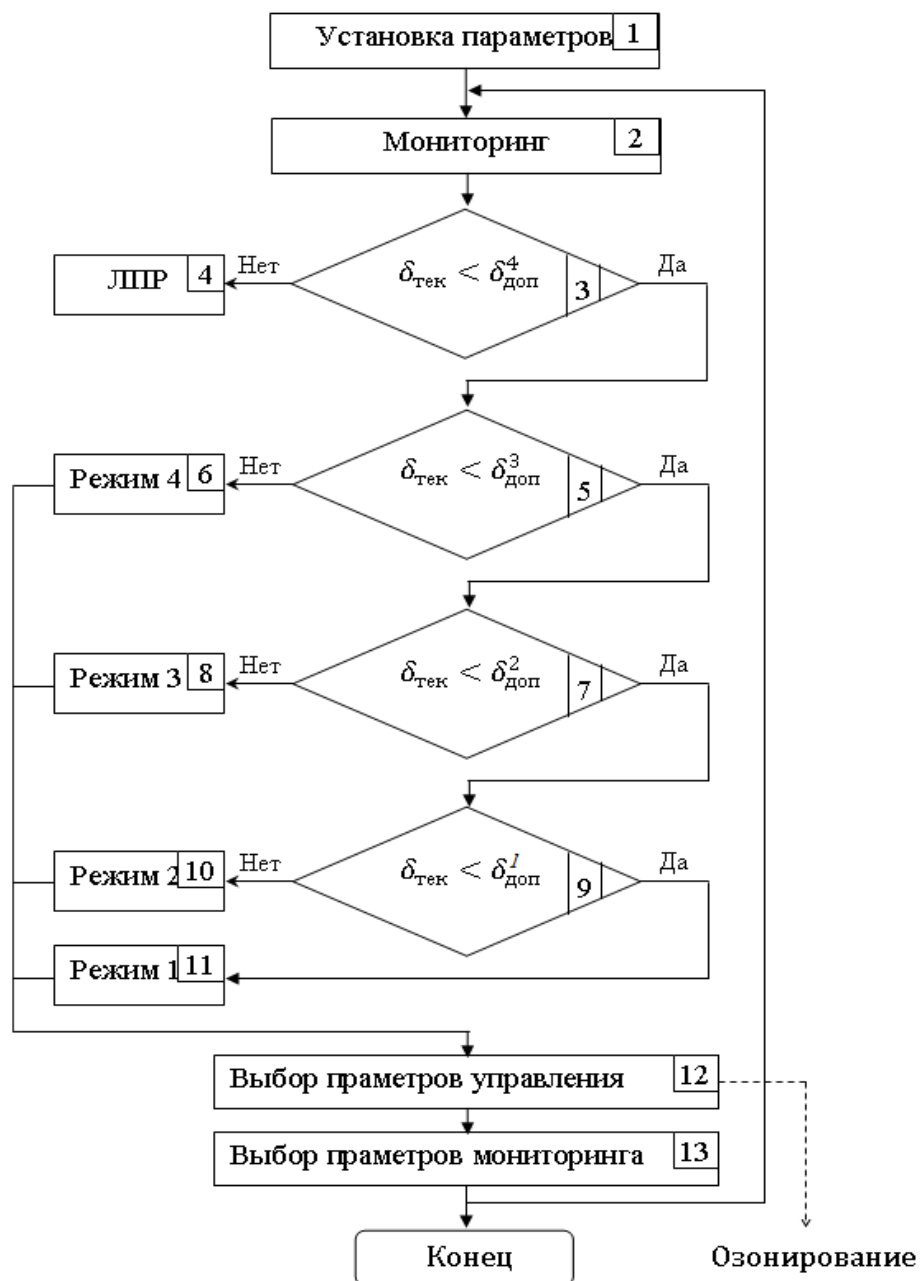
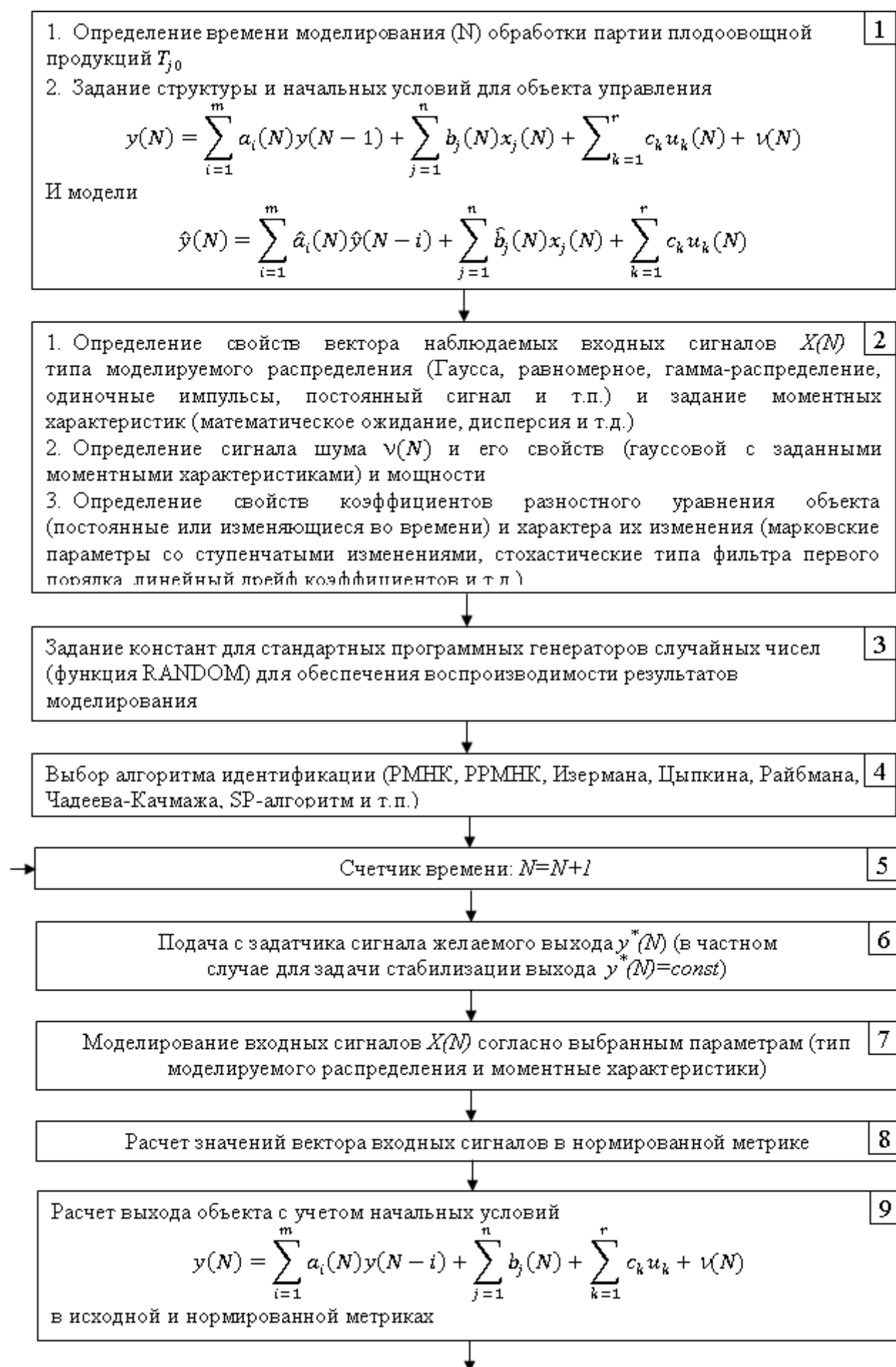


Рисунок 4.18 – Блок-схема выбора режима озонирования

В качестве датчика концентрации микроорганизмов может быть использован высокопроизводительный импактор «Флора-100» предназначенный для определения концентрации жизнеспособных микроорганизмов при проведении аттестации и текущего контроля классов чистоты воздуха в фармацевтической и пищевой промышленности (Микробиологический мониторинг производственной среды – МУК 4.2.734-99), а также для проведения мониторинга службами санэпиднадзора (Гигиенические критерии оценки и классификации условий труда по показаниям вредности и опасности факторов производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса – Р2.2.755-99). Пробоотборник рекомендуется для работы во всех классах чистоты А, В (100), С (10000) и D (100000).





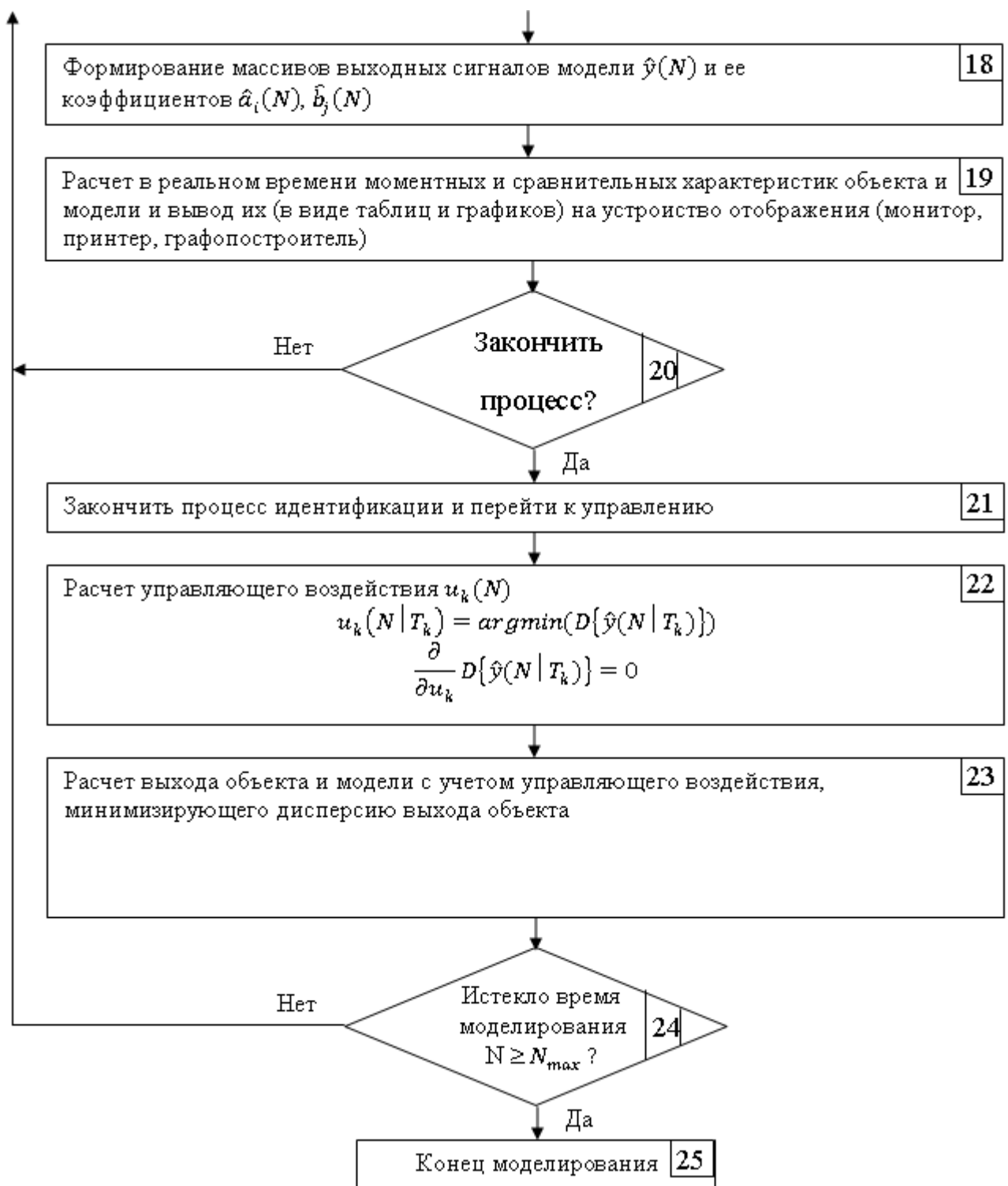


Рисунок 4.19 – Алгоритм компьютерного моделирования функционирования адаптивной системы управлений технологическими процессами озонирования с нестационарными параметрами

Таким образом, для иерархической распределенной АСУТП озонирования в закрытых помещениях разработан алгоритм адаптивной системы управления (рис. 4.19), визуализация которого осуществлена в среде МатЛаб.

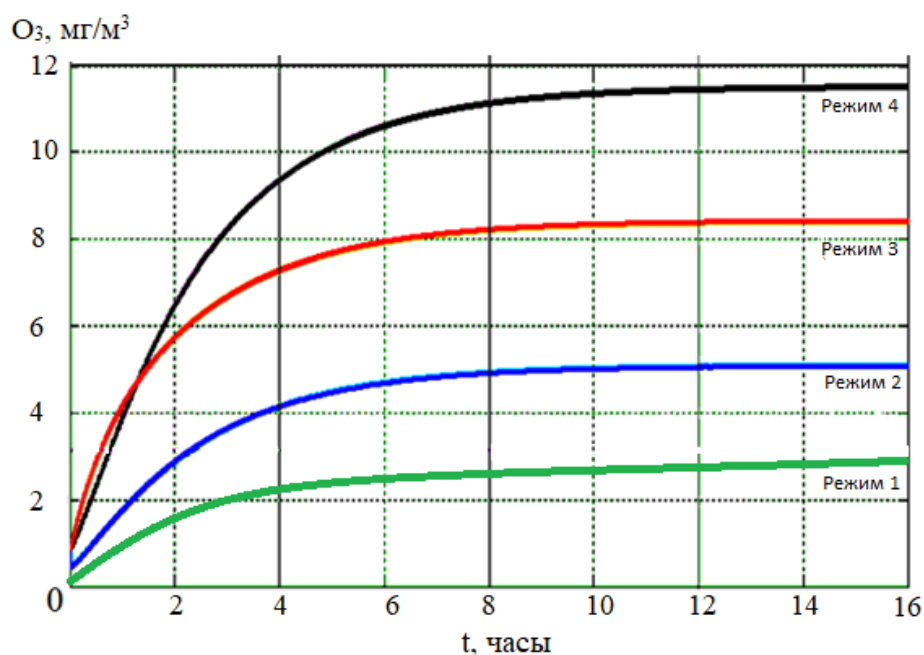


Рисунок 4.20 – Режимы озонирования в зависимости от количества концентраций микроорганизмов в воздухе озонируемого помещения

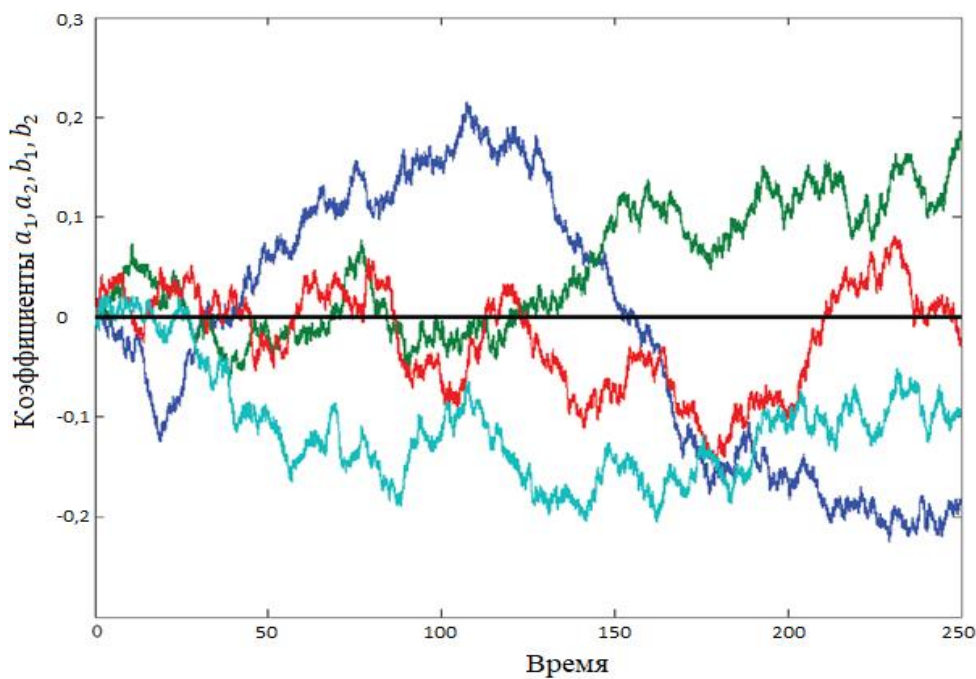


Рисунок 4.21 – Моделирование нестационарных коэффициентов a_1, a_2, b_1, b_2 объекта $y(N) = a_1(N)y(N-1) + a_2(N)y(N-2) + b_1(N)x_1(N) + b_2(N)x_2(N)$

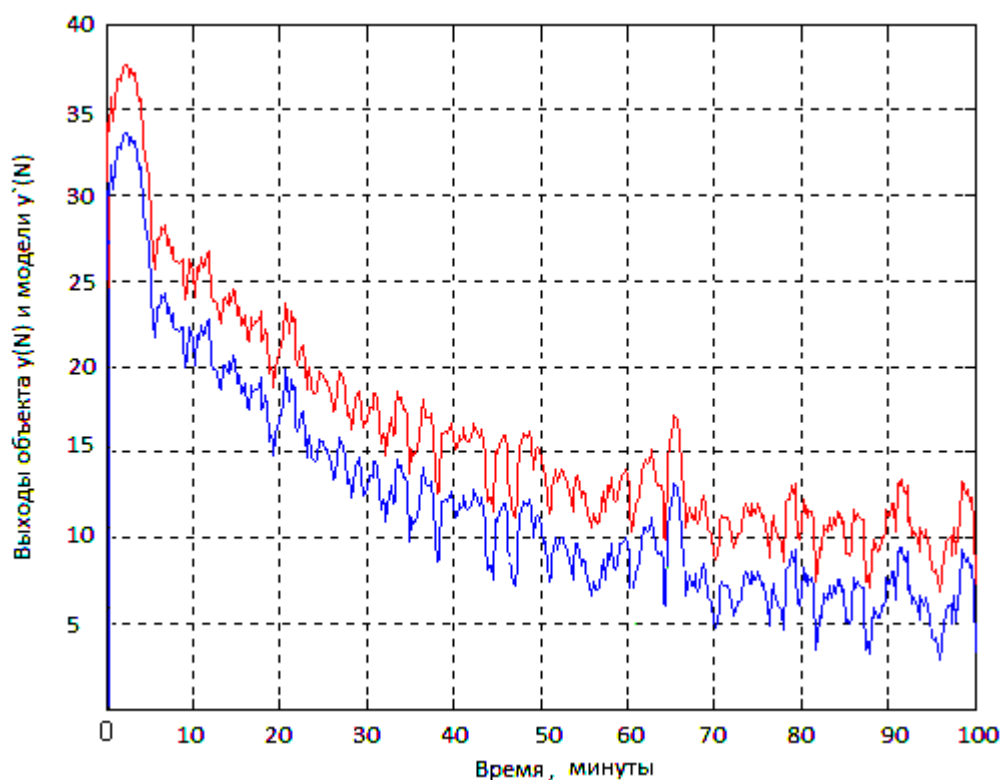


Рисунок 4.22 – Выходы нестационарного динамического объекта $y(N) = a_1(N)y(N-1) + a_2(N)y(N-2) + b_1(N)x_1(N) + b_2(N)x_2(N)$ (красная кривая) и АПМ $\hat{y}(N) = \hat{a}_1(N)\hat{y}(N-1) + \hat{a}_2(N)\hat{y}(N-2) + \hat{b}_1(N)x_1(N) + \hat{b}_2(N)x_2(N)$ (синяя кривая)

На рисунках 4.21, 4.22 приведены результаты моделирования функционирования адаптивной системы управления динамическим ТП озонирования. Результаты моделирования показывают высокую степень адекватности АПМ и нестационарного динамического объекта управления.

4.4 Оценка технико-экономического эффекта озонирования с автоматическим контролем и регулированием концентраций озона

Дезинфекция и стерилизация с помощью озона еще недостаточно широко применяются в пищевой промышленности. Дальнейшее ее развитие определяется потребностью народного хозяйства в более совершенных и экономических способах производства.

Единовременные затраты на осуществление процессов озонной технологий в пищевой промышленности окупаются быстро, например, при электрообработке 10 – 30 т покровных материалов в год затраты окупаются менее чем за один год. Это достигается в результате сокращения трудовых затрат на 20 – 50% (в зависимости от объема производства), а также из-за уменьшения расхода покровных материалов на 20 – 30%.

Экономическую эффективность обработки клубней озоновоздушной смесью определяли по картофелю и моркови для посадки.

На картофеле и моркови для посадки оценивали влияние озоновоздушной смеси при автоматическом контроле концентраций озона на потери при длительном хранении.

Расчет экономической эффективности был сделан исходя из существующих норм по следующей зависимости:

$$\mathcal{E}_{\text{оз}} = C_x - \mathcal{E}_{\text{эз}}$$

где: $\mathcal{E}_{\text{оз}}$ – экономический эффект от обработки клубней озоновоздушной смесью; C_x – стоимость дополнительно сохраненного картофеля за счет снижения потерь; $\mathcal{E}_{\text{эз}}$ – эксплуатационные затраты.

Обработка озоновоздушной смесью проводилась ежемесячно с ноября по февраль месяцы, длительность озонирования в месяц для картофеля – 36 часов, для моркови – 12 часов.

Потери по сравнению с контролем снизились на 8% для картофеля, для моркови на 7,5 %.

При расчетах приняты следующие исходные данные:

– Средняя цена на февраль месяц сохраненного картофеля (элита-1 репродукция) принята равной по данным 2017 года 137 тенге/кг, моркови - 117 тенге/кг

– Затраты на электроэнергию, связанные с озонированием согласно (табл. 1) приняты равными – 19,16 тенге/кВт·час.

– Амортизация озонатора (стоимость озонатора 90000 тенге, срок эксплуатации 7 лет) – 514,3 тенге/т.

– Оплата работы оператора 4,5 дня в месяц из расчета 500 тенге/т.

По данным разработчика озонатор используемой конструкции, рассчитан на обработку секции вместимостью до 25 тонн картофеля.

Следовательно, стоимость дополнительно сохраненного продукта составит:

$$C_x = (V \times P_n \times C_p) / 100$$

$$C_x = (25 \text{ т} \times 8\% \times 137000 \text{ тенге/т}) / 100 = 274000 \text{ тенге}$$

Где V – вместимость секции, равная 25 тонн; P_n – процент снижения потерь; C_p – цена продукта тенге/кг; тенге/т.

Таблица 4.7 – Затраты электроэнергии для заданного режима экспозиции озонирования

Режим озонирования	Экспозиция озонирования, час	Количество часов работы озонатора	Расход электроэнергии на озонирование за время хранения, кВт*	Стоимость энергозатрат на озонирование за время хранения	
Температура хранения 2 – 4 °С				тенге **	тенге/т
Ноябрь – февраль (ежемесячно)	Картофель 36	144	21,6	413,856	16,55
	Морковь 12	48	7,2	137,952	5,52

* – потребляемая мощность озонатора 0,15 кВт

** – стоимость электроэнергии 19,16 тенге/ кВт

Эксплуатационные расходы:

$$\mathcal{E}_{\text{оз}} = \mathcal{Z}_{\text{оп}} + A + C_{\text{оз}}$$

где, $\mathcal{Z}_{\text{оп}}$ – заработная плата оператора, тенге/т; A – амортизационное отчисление; $C_{\text{оз}}$ – затраты на электроэнергию связанные с озонированием.

Для картофеля:

$$\mathcal{E}_{\text{оз}} = 500 + 514,3 + 16,55 = 1030,85 \text{ тенге/т}$$

В пересчете на 1 тонну хранимого картофеля в секции эффект составил

$$\mathcal{E}_{\text{оз}} = 10960 - 1030,85 = 9929,15 \text{ тенге/т}$$

Экономическая эффективность озонирования для 25т картофеля

$$\mathcal{E}_{\text{оз}} = 9929,15 \times 25 = 248\,228 \text{ тенге за период хранения.}$$

Для моркови:

$$\mathcal{E}_{\text{оз}} = 167 + 514,3 + 5,52 = 686,82 \text{ тенге/т}$$

В пересчете на 1 тонну хранимого моркови в секции эффект составил

$$\mathcal{E}_{\text{оз}} = 8775 - 686,82 = 8088,18 \text{ тенге/т}$$

Экономическая эффективность озонирования для 25т моркови

$$\mathcal{E}_{\text{оз}} = 8088,18 \times 25 = 202\,204,5 \text{ тенге за период хранения.}$$

4.5 Выводы по разделу

1. Был разработан целый ряд экспериментальных установок и измерительных устройств, электронная аппаратура и конструкции разрядных камер для проведения систематических исследований электрических характеристик коронно-барьерного разряда и определения производительности и удельного энергетического выхода озона.

2. Разработана структурная схема озонирования воздуха, включающая источник высоковольтных импульсов напряжения (ИВИН), коронно-разрядные ячейки, озонметры и блок автоматического регулирования частоты (БАРЧ) генератора. Экспериментально определены вольтамперные характеристики коронно-разрядных ячеек при различных количествах озонирующих трубок озонатора ОВИ-1, что позволило обеспечить оптимальный выход озона. Выполнен сравнительный анализ экспериментальных значений производительности удельного энергетического выхода озона озонатора ОВИ-1 с результатами измерения концентраций озона йодометрическим методом и с применением трубок ТИ-О₃ и сильфонного аспиратора АМ-0059.

3. Проведена оценка структуры и параметров (коэффициентов) настраиваемой математической модели адаптивной прогнозирующей модели ТП озонирования при использовании активной идентификации на основе опытных испытаний автоматизированной установки озонирования воздуха в производственных условиях овощехранилища на примере картофеля и моркови. Разработан алгоритм идентификации по МНК. Полученные результаты показывают, что обработка клубней картофеля озоновоздушной смесью снизила общие потери до 8%, в том числе убыль массы – до 3,4% в сравнении с контролем. Обработка моркови дали следующие результаты: общие потери снижены на 7,5 %, в том числе убыль массы 5% в сравнении с контролем. Производственные испытания подтвердили основные результаты,

полученные при лабораторных испытаниях в холодильных камерах с температурой хранения $2 \div 4$ °С.

4. Показана адекватность нестационарного динамического ТП озонирования и его адаптивной прогнозирующей модели путем нахождения дисперсию адекватности $S_{ад}^2$.

5. Для иерархической распределенной АСУТП озонирования в закрытых помещениях разработан алгоритм адаптивной системы управления, визуализация которого осуществлена в среде МатЛаб.

6. Оценка технико-экономического эффекта применения автоматизированной установки озонирования воздуха показывает на высокую эффективность и выгодность использования системы автоматического контроля и регулирования концентраций озона для обработки овощей и фруктов в овощехранилищах.

7. Результаты исследований, представленных в четвертом разделе, опубликованы в [44, 99, 102], а так же подтверждены протоколом испытания озонатора, актом производственных испытаний автоматизированной установки и актом о внедрении научных результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения данной работы, поставленная цель и задачи диссертации выполнены в полном объеме и получены следующие результаты, имеющие научную и практическую ценность.

1. Решена задача по разработке усовершенствованной конструкций озонатора с применением свойств электрического ветра, возникающего в условиях коронного разряда, что позволило упростить конструкцию озонатора и получить малые удельные энергозатраты на единицу веса вырабатываемого озона.

2. Разработан, изготовлен и испытан озонатор высоковольтных импульсов ОВИ-1 работающий в коронно-барьерном разряде с более высоким выходом озона.

3. Предложенное устройство обеспечивает автоматический контроль и регулирование концентрации озона в закрытом объеме при высокой чувствительности и надежности результатов измерений, что достигается автоматизацией измерения и регистрацией данных микропроцессором и электронной системой регулирования работой озонатора

4. Получены адаптивные прогнозирующие модели технологического процесса озонирования при хранении сельскохозяйственной продукции, а также условия идентифицируемости объекта управления, с учетом которого синтезирован алгоритм идентификации. Обоснован выбор проекционного алгоритма идентификации Качмажа.

5. Разработан алгоритм синтеза адаптивной прогнозирующей модели нестационарного динамической системы управления ТП озонирования. С целью оценки устойчивости адаптивной системы с идентификатором воспользуемся алгебраическим критерием устойчивости Шур-Кона для дискретных систем.

6. Выполнен синтез автоматизированной системы мониторинга и оперативного управления установкой озонирования воздуха при хранении сельскохозяйственной продукции в закрытом объеме с использованием разработанной математической модели.

7. Проведена оценка структуры и параметров (коэффициентов) настраиваемой математической модели адаптивной прогнозирующей модели ТП озонирования при использовании активной идентификации на основе опытных испытаний автоматизированной установки озонирования воздуха в производственных условиях овощехранилища на примере картофеля и моркови.

8. Разработан алгоритм идентификации по МНК.

9. Для иерархической распределенной АСУТП озонирования в закрытых помещениях разработан алгоритм адаптивной системы управления, визуализация которого осуществлена в среде МатЛаб.

10. Полученные результаты показывают, что обработка клубней картофеля озоновоздушной смесью снизила общие потери до 8%, в том числе убыль массы – до 3,4% в сравнении с контролем. Обработка моркови дали

следующие результаты: общие потери снижены на 7,5 %, в том числе убыль массы 5% в сравнении с контролем. Производственные испытания подтвердили основные результаты, полученные при лабораторных испытаниях в холодильных камерах с температурой хранения 2 ÷ 4 °С.

11. Разработанная автоматизированная установка озонирования воздуха прошла научно – экспериментальные, производственные испытания в:

- Люблинском политехническом университете;
- Овощехранилище продовольственного рынка «Арзан», г. Кызылорда.

12. Научные результаты диссертационной работы внедрены в процесс хранения и подготовки продукции компании «Herbarol» г.Люблин (Польша).

13. По основным результатам выполненных исследований и разработок подготовлены и опубликованы более 25 научных работ, в том числе 1 книга, из них 5 работ опубликованы в изданиях, рекомендованных комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК.

14. В процессе работы получены 3 предпатента и 3 инновационных патента

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Габриэльянц М.А. Резго Г.Я. О возможности сохранения качества и удлинения сроков хранения пищевых продуктов путем озонирования камер хранения// Товароведение пищевых продуктов. – М., 1976. Вып. 5. – С. 124-128.
- 2 Матус В.К., Калер Г.В., Мельникова Л.К. и др. Влияние озонирования на свойства покровных тканей и газообмен плодов// Всесоюз. Конференция по применению электронно-ионной технологии в народном хозяйстве: Тезисы. Тбилиси, 1981. – С.179 –180.
- 3 Колодязная В.С., Супонина Т.А. Хранение пищевых продуктов с применением озона// Холодильная техника. 1975. №6. – С.39-41.
- 4 Белых И.А. Токсическое действие озона на бактерии *Escherichia coli* / И.А. Белых, И.П. Высеканцев, А.М. Грек, А.В. Сакур, В.В. Марущенко. – 2009. – № 1. – С. 48-53.
- 5 Троцкая Т.П., А.А. Литвинчук, А.М. Миронов, Е.Б. Хилько, А.И. Рачковская. Энергосберегающая технологий обеззараживания труднодоступного производственного оборудования, емкостей и систем коммуникаций на предприятиях пищевой промышленности АПК. Материалы III-й Междунар. научно-технической конф. «Аграрная энергетика в XXI столетии», 2005г. – С. 21-23.
- 6 Caprio V., lignola P.G., insole A. Gas phase ozone evaluation by thermal decomposition technique// Analytical Chemistry. 1980. Vol/ 52. N 7. – P. 1123-1125.
- 7 Болога М.К., Литинский Г.А. Электроантисептирование в пищевой промышленности. – Изд. Штаница: 1988 г. –180с.
- 8 Супонина Т.А. Действие озона на микроорганизмы, поражающие картофель при хранении// Технологическая обработка и хранение пищевых продуктов. –Л., 1975. Вып. 3. – С. 69-75.
- 9 Майстренко С.М., Миронов Е.С., Бондаренко Г.Е., Будько Н.П.//Применение озоно-аэроионной обработки для снижения потерь картофеля и овощей при хранении / Всесоюзная конференция по применению электронно-ионной технологии в народном хозяйстве: Тезисы. Тбилиси, 1981. – С. 169.
- 10 Ильина Е.А., Коваль В.В., Козлова А.А. и др. Санитарная обработка холодильных камер озонированием// Холодильная техника. 1979. №8. – С. 56-57.
- 11 Луковникова Г.А., Жарова С.Н., Галдун Т.И., Пакшин В.В. Влияние озона на качество репчатого лука при длительном хранении// Всесоюз. конф. по применению электронно-ионной технологии в народном хозяйстве: Тезисы. Тбилиси, 1981. – С. 157.
- 12 Жарова С.Н., Бондаренко Л.П., Майшева Л.К., Чужова И.М. Влияние различных дезинфицирующих средств на качество и сохранность овощей// вопросы улучшения качества и хранения пищевых продуктов. – М., 1979. Вып. 10. – С. 106-112.

- 13 Жарикова Г.Г. Микробиология продовольственных товаров. Санитария и гигиена. Учебник для студ.высш.учеб.заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.
- 14 Аиба Ш., Хемфри А., Миллис Н. Биохимическая технология и аппаратура. – М.: Пищевая промышленность, 1975. – 288с.
- 15 Hocgeson J.A., Baumgardner R.E., Martin B.E., Rehme K.A. Stoichiometry in the neutral iodometric procedure for ozone by Gas-Phase Titration with Nitric Oxide// Analytical Chemistry. 1971. Vol. 43. N 8. – P. 1123-1126.
- 16 Friedrich Zürn. Flaschensterilisation mit Ozon// Neinwirtschaft. 1982. Vol. 118. N 30. – P. 793-794; 796-797; 800.
- 17 Lanting R.W. Modification of potassium iodide procedure for improved stoichiometry// Atmospheric Environment. 1979. Vol. 13. N 4. – P.553-554.
- 18 Мороз К.Ю., Матус В.К., Мельникова Л.К., Конаев С.В. Действие озона на энергосопряженные функции цитоплазматической мембраны// Всесоюз. конф. по применению электронно-ионной технологии в народном хозяйстве: Тезисы. Тбилиси, 1981. – С. 178-179.
- 19 Конев С.В., Калер Г.В., Матус В.К. Механизмы O_3 – индуцируемых повреждений биологических мембран// Всесоюз. конф. по применению электронно-ионной технологии в народном хозяйстве: Тезисы. Тбилиси, 1981. – С. 182-183.
- 20 Конев С.В., Матус В.К., Лысков Т.И. Фунгицидная эффективность озона// Всесоюз. конф. по применению электронно-ионной технологии в народном хозяйстве: Тезисы. Тбилиси, 1981. – С. 180-181.
- 21 Жунгиету Г.И. Новые методы хранения плодоовощной продукции в МССР: Обзор. Кишинев: МолдНИИТИ, 1980. – 41 с.
- 22 Гросман Э.Р., Уланов Н.М., Бутько Н.П. Озонирование и ионизация воздуха для снижения потерь при хранении картофеля// Всесоюз. конф. по применению электронно-ионной технологии в народном хозяйстве: Тезисы. Тбилиси, 1981. – С. 161-162.
- 23 Монтик П.Н., Коновалов С.А. О действии электронно-ионной обработки на микрофлору пищевого сырья// Пути сохранения сельскохозяйственной продукции: Тезисы докладов. Одесса, 1978. – С. 66-67.
- 24 Балан Е.Л., Остапенко А.М., Назаров В.Н. и др. Электронно-ионная обработка овощей// Хлебопекарная и кондитерская промышленность. 1978. № 6. – С. 40-41.
- 25 Левит М.М. Практическое применение электронно-ионной технологии при транспортировке винограда и цитрусовых на судах Минречфлота РСФСР// Всесоюз. конф. по применению электронно-ионной технологии в народном хозяйстве: Тезисы. Тбилиси, 1981. – С. 164-165.
- 26 Александров А.Г. Орлоф Ю.Ф. Идентификация при коррелированных входах // Тр. III Международной конференции «Идентификация систем и задач управления» SICPRO`04. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2004. – С. 90-93.

27 Исследование нестационарной системы управления с комбинированным алгоритмом адаптации // Сб. трудов 6-го Санкт-Петербургского симпозиума по теории адаптивных систем, посвященный памяти Я.З. Цыпкина. В 2 т. 1999. СПб, Т.2. – С. 13-16.

28 Электротехнологии в сельском хозяйстве. Учебник для студентов вузов / С.В. Оськин. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – 501 с.

29 Бородянский В.В., Кошляревский С.В. Адаптивное управление динамическим существенно нестационарным объектом. // Автоматика и телемеханика. 1995. №6. – С. 111-116.

30 Браунли К.А. Статистическая теория и методология в науке и технике / М.: Наука, 1977. – 408с.

31 Бахтаев Ш.А. и др. Озонаторы на коронном разряде: Аналит.обзор /КазгосИНТИ. –1998. – 30с.

32 Жиров М.В. Идентификация и адаптивное управление в АСУТП виноделия // Промышленное АСУ и контроллеры. 2001. № 10. – С. 26-30.

33 Жиров М.В. Макаров В.В. Адаптивная идентификация и управление нестационарными технологическими процессами // Тр. Международной конференции «параллельные вычисления и задачи управления», РАСО 2001. Москва, 2-4 октября 2001г. М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. В 3 ч. – С. 92-105.

34 Жиров М.В., Макаров В.В. Адаптивная идентификация нестационарных технологических процессов с марковскими параметрами в задачах стохастического управления // Автоматика и телемеханика. 2002. №2. –С. 56-70.

35 Жиров М.В., Макаров В.В. Адаптивная система управления нестационарными технологическими процессами с идентификатором и ЛПР // Тр. II Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO`03. Москва, 29-31 января 2003г. М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. – С. 184-189.

36 Жиров М.В. В.В. Макаров., В.В. Солдатов. Идентификация и адаптивное управление технологическими процессами с нестационарными параметрами. – М.: Изд-во МГТУ им . Н.Э. Баумана, 2011. – 203с.

37 А.С. 459210 (СССР) Устройство для антисептирования пищевых продуктов /А.И.Бут.Опубл.в Б.И., 1975, №1.

38 Зайцев В.А. Автоматизация управления системами озонированной очистки сточных вод и отходящих газов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Москва, 2001. – 144 с.

39 Роденков Е.В. Математическое и алгоритмическое обеспечение задачи автоматизации процесса дезинфекции ПЭТ-бутылок с помощью озона (на примере розлива пива). Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Москва, 2005. – 135 с.

40 Матвеев С.Д. Исследование и разработка коронно-разрядного озонатора для непрерывной дезинфекции яиц в инкубаторе. Автореферат

диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Санкт-Петербург, 2009. – 20с.

41 Маемеров М.М. Технические основы ионноозонной обработки зерна пшеницы. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Алматы, 2009. – 228 с.

42 Овсянников Д.А. Система автоматического управления концентрацией озона в улье. Научный журнал КубГАУ, №81 (07), Краснодар, 2012. – С. 127-133.

43 Ермаков С.М. Математическая теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1978. – 273 с.

44 Бахтаев Ш.А, Сыдыкова Г.К., Тойгожинова А.Ж., Коджабергеннова А.К. Коронный разряд на микроэлектродах. ISBN 978-601-7015-58-9. Кызылорда 2017. – 212 с.

45 Бахтаев Ш. А., Боканова А.А., Бочкарева Г.В., Сыдыкова Г.К. Физика и техника коронноразрядных приборов. – Алматы, 2007г., – 213с.

46 Жиров М.В., Шаховский А.В. Разработка адаптивной компьютерной системы управления термообработкой виноматериалов // Виноград и вино России. 2000. №2. – С. 33-35.

47 Бахтаев Ш.А., Абишев М.А., Боканова А.А., Кожаспаев Н.К. Озонная технология и охрана окружающей среды. Издательство КазГосЖенПи. – Алматы 2001. – 122с.

48 Жиров М.В., Шаховский А.В. Разработка вычислительной процедуры для идентификации технологических объектов управления в режиме с использованием МНК для ARX-модели // Материалы VII Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в пищевой промышленности третьего тысячелетия ». Вып. 6 (Т. III), М.: МГТА, 2001. – С. 15-17.

49 Жиров М.В., Шаховский А.В. Разработка вычислительных процедур для идентификации технологических объектов управления в режиме ON-LINE с использованием РМНК, РРМНК для ARX- и ARMAX – моделей // Материалы VII Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в пищевой промышленности третьего тысячелетия ». Вып. 6 (Т. III), М.: МГТА, 2001. – С. 11-14.

50 Круг Г.К., Сосулин Ю.А., Фатуев В.А. Планирование эксперимента в задачах идентификации и экстраполяции. М.: Наука, 1977. – 208с.

51 Gernak M., Skalny S., Veis S. // Asta.Phys.Slov. 1979. Vol.29, N1. – P.31-38.

52 Masuda S. //IEEE Trans. Ind.Appl. 1986. Vol.22, N4. – P.886-891.

53 Благовещенская М.М., Иванов В.С., Роденков Е.В. Разработка электронной технологии для управления процессами транспортировки, хранения, переработки сельскохозяйственного сырья // Материалы научно-технической конференции «Технологии живых систем», –М.: ИК МГУПП, 2004. – С. 53-56.

54 Мнацакян А.Х., Найдис Г.В., Солозобов Ю.М. К теории коронного разряда в нагретом воздухе //ТВТ,1986.Т.24, №6. – С.1060-1066.

55 Бахтаев Ш.А., Тойгожинова А.Ж., Коджабергена А.К. Физика процессов образования и потери озона отрицательной короне Вестник национальной академии наук республики Казахстан №4 – Алматы, 2014. – С. 36-41

56 Алмагамбетов Б.Н., Бахтаев Ш.А., Даулетбаков Т.С. Электросинтез озона и озонная технология //Комплексное использование минерального сырья. 1993, №6, С.38-43.

57 Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. – М., МГУ, 1987. – 237 с.

58 Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. М., Атомиздат, 1975, – 271с.

59 Бахтаев Ш.А., Бокова Г.И., Петров В.С. О развитии электронной лавины в атмосферном воздухе //Радиационные и диффузионные явления. Межвуз. сб. АГУ, Алматы, 1992, – С.25-29.

60 Блога М.К. Электроантисептирование в пищевой промышленности. – Кишинев, 1988. – 156с.

61 Бахтаев Ш.А. Коронный разряд на микропроводах. Алма-Ата, Наука, 1984, 208с.

62 Бахтаев Ш.А. Особенности униполярной короны при высоких напряженностях поля. Известие МН-АНРК. Серия физ-мат. №6. 1998. – С. 135-141.

63 Джуварлы Ч.М., Горин Ю.В., Мехтизаде Р.Н. Коронный разряд в электроотрицательных газах. Баку, ЭЛМ, 1988. – 144с.

64 Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. – СПб: Профессия, 2009. – 592 с.

65 Бахтаев Ш.А., Тойгожинова А.Ж., Сыдыкова Г.А. О распределении плотности озона в разрядной зоне отрицательной короны. Доклады национальной академии наук республики Казахстан №4, –Алматы, 2014. – С.41-46.

66 Рубашов И.Б., Бортников Ю.С. Электрогазодинамика. М.: Атомиздат, 1971. – 168с.

67 Кисляков Е.В. Моделирование коронного разряда в электроотрицательном и нейтральном газах. //Молодой ученый. №2. – 2014. – С. 62-67.

68 Sattari P., Adamiak K. Numerical Simulation of Trichel Pulses in a Negative Corona Discharge in Air // IEEE. Transactions on Industry Applications. 2010. Vol. 47. – P. 1935-1943.

69 A. Toigozhinova, G. Yussupova. Mathematical modeling of processes in the zone of corona discharge ionization. Lubelskie Dni Nauki i Biznesu. Pod patronatem honorowym. Polskiego stowarzyszenia tomografii procesowej I Komitetu elektrotechniki polskiej akademii nauk. Warsztaty doktoranckie. WD2016. Science conference. Lublin. 11 – 13 Czerwca 2016. ISBN 978-83-60617-45-8. – P. 219-220.

70 Bahtaev Sh., Toigozhinova A.Zh., Zhirnova O.V., Wojcik W.T., Suleimenov B.A., Koshimbayev Sh.K. Modeling of processes in the zone of corona

discharge ionization. Известия национальной академии наук республики Казахстан №1, –Алматы, 2017. – С. 197-204,

71 А.Ж.Тойгожинова. Моделирование коронного разряда с учетом диффузии ионов. Вестник КазНИТУ, №3. – Алматы, 2016. – С. 378-382.

72 Верецагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 159 с.

73 Льюнг. Л. Идентификация системы: Теория пользователя / пер. с англ.: под ред. Я.З. Цыпкина. М.: Наука, 1991. – 432 с.

74 Бахтаев Ш.А. Озонатор на коронном разряде //Известия МН-АН РК. Сер. физ.-мат.,1998. №6. – С.73-74.

75 Бахтаев Ш.А. и др. Озонаторы на коронном разряде //Новости науки Казахстана, Научно-техн. сб. МНАН РК,Алматы,1998. №6. – С.19-21.

76 Кошимбаев Ш. К., Тойгожинова А.Ж. Исследование процесса коронного разряда как объекта управления. Труды международных сатпаевских чтений «Роль и место молодых ученых в реализации новой экономической политики Казахстана», Том IV, направление инновации по информационным, телекоммуникационным и космическим технологиям, – Алматы, 2015. – С.235-239.

77 Божко И.В. Электродная система для разрядных устройств с положительной стримерной короной / И.В. Божко, И.С. Петухов, Н.И. Фальковский // Техн. электродинамика. – 2006. –№3. – С. 49-53.

78 В.В. Власов. Элементарные процессы в плазме газового разряда. –Х.: ХНУ, 2008. –175с.

79 Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. М., МГУ, 1987. – 237 с.

80 Предпатент РК №12180. Способ получения озона и устройство для его осуществления // Бахтаев Ш.А. и др. Оpubл.Бюлл. №11, 15.11.2002.

81 Бахтаев Ш.А., Гринман И.Г. Коронноразрядные приборы. Алма-Ата, Наука, 1975. – 212 с.

82 Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – 2-е изд. – М.: Наука, 1992. – 536 с.

83 Предпатент РК №12180. Способ получения озона и устройство для его осуществления // Бахтаев Ш.А. и др. Оpubл.Бюлл. №11, 15.11.2002.

84 Предпатент РК № 19274. Способ усиления электрического тока в озонаторе. Бахтаев Ш.А., Дюсебаев М.К., Нурпеисова К.М. Тойгожинова А.Ж. Оpubл. Бюлл. №4, 15.04.2008.

85 Инновационный патент РК №24373. Озонатор. Бахтаев Ш.А., Тойгожинова А.Ж., Сыдыкова Г.К., Амантаев К.О. Оpubл. бюл. №8, 15.08.2011.

86 Патент на полезную модель №2185. Озонирующий элемент. Бахтаев Ш.А, Кошимбаев Ш.К., Боканова А.А., Сыдыкова Г.К., Тойгожинова А.Ж. Оpubл. бюл. №10, 30.05.2017.

87 Sh. A. Bakhtayev, Sh.K. Koshimbaev, A.Zh. Toygozhinova. Research and Development of system elements of automatic control and regulation of ozone

concentration in enclosed space. Research Journal of applied Sciences 10(12): 2015, Medwell Journals. – P. 947-955.

88 Бахтаев Ш.А., Сыдыкова Г.К., Тойгожинова А.Ж. Разработка источника высоковольтных импульсов для озонаторной ячейки // Межд. Науч.-практ. конф. «Перспективные направления альтернативной энергетики и энергосберегающие технологии» – Шымкент: 2010. – Том 2. – С.63-65.

89 Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник/ Г.С. Найвелт и др. – М.: Радио и связь, 1985г. – 576 с.

90 Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: Справочник / Под ред. С.В. Якубовского. – М.: Радио и связь, 1992. – 432 с.

91 Бойко В.И. и др. Схемотехника электронных систем. Аналоговые и импульсные устройства. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 496 с.

92 Бахтаев Ш.А., Жумагулов К.К., Сыдыкова Г.К., Тойгожинова А.Ж. Применение озона в технологии хранения сельхозпродуктов // Межд. научно-практ. конференция, посвященная 60-летию факультета «Энергетические и информационные системы». – Алматы, 2010. – С. 161-164.

93 Основы управления технологическими процессами / под ред. Н.С. Райбмана. М.: Наука 1978. – 440 с.

94 Инновационный патент KZ 30010. Устройство для автоматического контроля и регулирования концентраций озона в закрытом объеме. Бахтаев Ш.А., Тойгожинова А.Ж., Сейтимбетов А.М., Сыдыкова Г.К., Коджабергена А.К. Оpubл. бюл. №6, 15.06.2015.

95 Инновационный патент РК №20581. Озонометр // Бахтаев Ш.А. и др. Оpubл. Бюлл. №12, 15.12.2008.

96 Bohdan Rusyn, Yuri Lysak, Tomasz Ławicki, Aron Burlibay, Ainur Toigozhinova. Stereo matching using oriented spatial Habor filters.. Poland, 2015 : Proc. of SPIE – 2015.

97 Ш.А. Бахтаев, А.Ж. Тойгожинова, О.В. Жирнова, W. Wojcik, Б.А. Сулейменов, Ш.К. Кошимбаев. Моделирование процесса озонирования воздуха в рабочем объеме при сжигании биогаза. Высшая школа Казахстана. Международное научно-педагогическое издание №1(1). – Алматы 2017. – С. 280-289.

98 Петров В.Н. Рутковский В.Ю., Земляков С.Ю. Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами. М.: Нака, 2002. – 303 с.

99 Ш.А. Бахтаев, А.Ж. Тойгожинова, А.М. Сейтимбетов, О.В. Жирнова, А.А. Тилеубаева. Разработка автоматизированной установки для озонирования воздуха в рабочем объеме. Известия национальной академии наук республики Казахстан №6. – Алматы, 2016. – С. 136-145,

100 Райбман Н.С. Адаптивное управление с идентификатором // Измерения, контроль, автоматизация: Научн.-техн. сборник обзоров / ЦНИИТЭИ приборостроения. 1976. Вып. 1 (15). – С. 72-78.

101 Колодязная В.С., Переверзев Д.С. Современные технологии длительного хранения плодоовощной продукции и картофеля //Защита

сельскохозяйственной продукции от вредных организмов при хранении.- Л., 1991. – С. 35-42.

102 Smolarz, W. Wojcik, K. Gromaszek, P. Komada, V. Lytvyenko, N. Mussabekov, L. Yesmakhanova, A. Toigozhinova. Artificial intelligence methods in diagnostics of coal-biomass blends co-combustion in pulverised coal burners. Proceedings of the fifth national congress of environmental engineering, Lublin, Poland, 29 may – 1 june, 2016. Environmental Engineering V – Pawlowska & Pawlowski (Eds), 2017. – P. 311-317.

103 Разумовский С.Д., Заиков Г.Е. Озон и его реакции с органическими соединениями (кинетика и механизм).М.,Химия,1974. – 322с.

104 Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. М.: МГУ, 1998. – 480с.

105 Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда.М., МГУ, 1989. –176с.

106 Райбман Н.С. О концепции адаптивных систем управления с идентификатором // Автоматика и телемеханика. 1982. №3. – С. 54-60.

107 Протокол испытания озонатора ОВИ-1 с целью определения концентраций озона. №41-02/13-2135, от 12.05.2010. Казахстанская республиканская санитарно эпидемиологическая станция. Алматы, 2010.

108 Сыздыков Д.Ж. Идентификация в системах управления. – Алматы: Эверо, 2007. – 216 с.

109 Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-ти томах. – Т.3. Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. –М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 616 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Программа управления БАРЧ в режиме «МК»

```
/*Рабочая программа для БАРЧ-М*/
#include <EEPROM.h>
#define CONTRGUN_PIN3
#define RELE_PIN4
void setup(){
byte SR1=0;
int SR2=QKT; // Задается значение концентрации озона для картофеля > чем 255
byte h2=highbyte(SR2); //выделяется старший байт слова
byte low2=lowbyte(SR2); //выделяется младший байт слова
int SR3=QLK; //Задается значение концентрации озона для лука > чем 255
byte h3=highbyte(SR3);
byte low3=lowbyte(SR3);
int SR4=QMK; // Задается значение концентрации озона для моркови > чем 255
byte h4=highbyte(SR4);
byte low4=lowbyte(SR4);
int SR5=TKT; //Задается время облучения для картофеля
byte h5=highbyte(SR5);
byte low5=lowbyte (SR5);
int SR6=TLK; //Задается время облучения для лука
byte h6=highbyte(SR6);
byte low6=lowbyte(SR6);
int SR7=TMK; //Задается время облучения для моркови
byte h7=highbyte(SR7);
byte low7=lowbyte(SR7);
int sensor Pin=A0;
int ozonr1=0;
EEPROM.write (11,h2); //В энергонезависимую память по адресу 11 помещается значение
старшего байта концентрации озона для картофеля
EEPROM.write (12,low2); // В энергонезависимую память по адресу 12 помещается значение
младшего байта концентрации озона для картофеля
EEPROM.write (13,h3);
EEPROM.write (14,low3);
EEPROM.write (15,h4);
EEPROM.write (16,low4);
EEPROM.write (17,h5);
EEPROM.write (18,low5);
EEPROM.write (19,h6);
EEPROM.write (20,low6);
EEPROM.write (21,h7);
EEPROM.write (22,low7);
PIN MODE(3,OUTPUT); //порт ШИМ настраивается на выход
PIN MODE(4,OUTPUT);
}
{
Serial.begin(9600); //задается скорость передачи последовательного порта
}
{
```

```

SR1=Serial read(); //считывается содержимое кода выбора вещества
EEPROM.write(10,SR1); //Кодвыбора вещества помещается в энергонезависимую память по
адресу 10
void loop()
byte SR1;
SR1=EEPROM.read(10);
switch(SR1) {
case 1:// выбор картофеля для облучения
int read SR-2M: //Формирование целого числа из двух байт из выбранных адресов в EEPROM.
{
byte high=EEPROM.read(11);
byte low=EEPROM.read(12);
return(high<<8)+low;
}
SR-2M=constQ; //В ячейке SR-2M хранится заданное значение кода для концентрации озона
для картофеля
int read SR-5M;
{
byte high=EEPROM.read(17);
byte low=EEPROM.read(18);
return(high<<8)+low;
}
constT=SR-5M/=10000; //Определяется целое число для счетчика времени
constT=counter; это число помещается в программный счетчик времени .
break;
goto Workozon; //Переход из основной программы в рабочую программу озонирования
закрытого объема.
case2:
int readSR-3M;
{
byte high=EEPROM.read(13);
byte low=EEPROM.read(14);
return(high<<8)+low;
}
SR-3M=constQ;
int readSR-6M;
{
byte high=EEPROM.read(19);
byte low=EEPROM.read(20);
return(high<<8)+low;
}
constT=SR-6M/=10000;
constT=counner;
break;
goto Workozon:
case3:
int read SR-4M;
{
byte high=EEPROM.read(15);

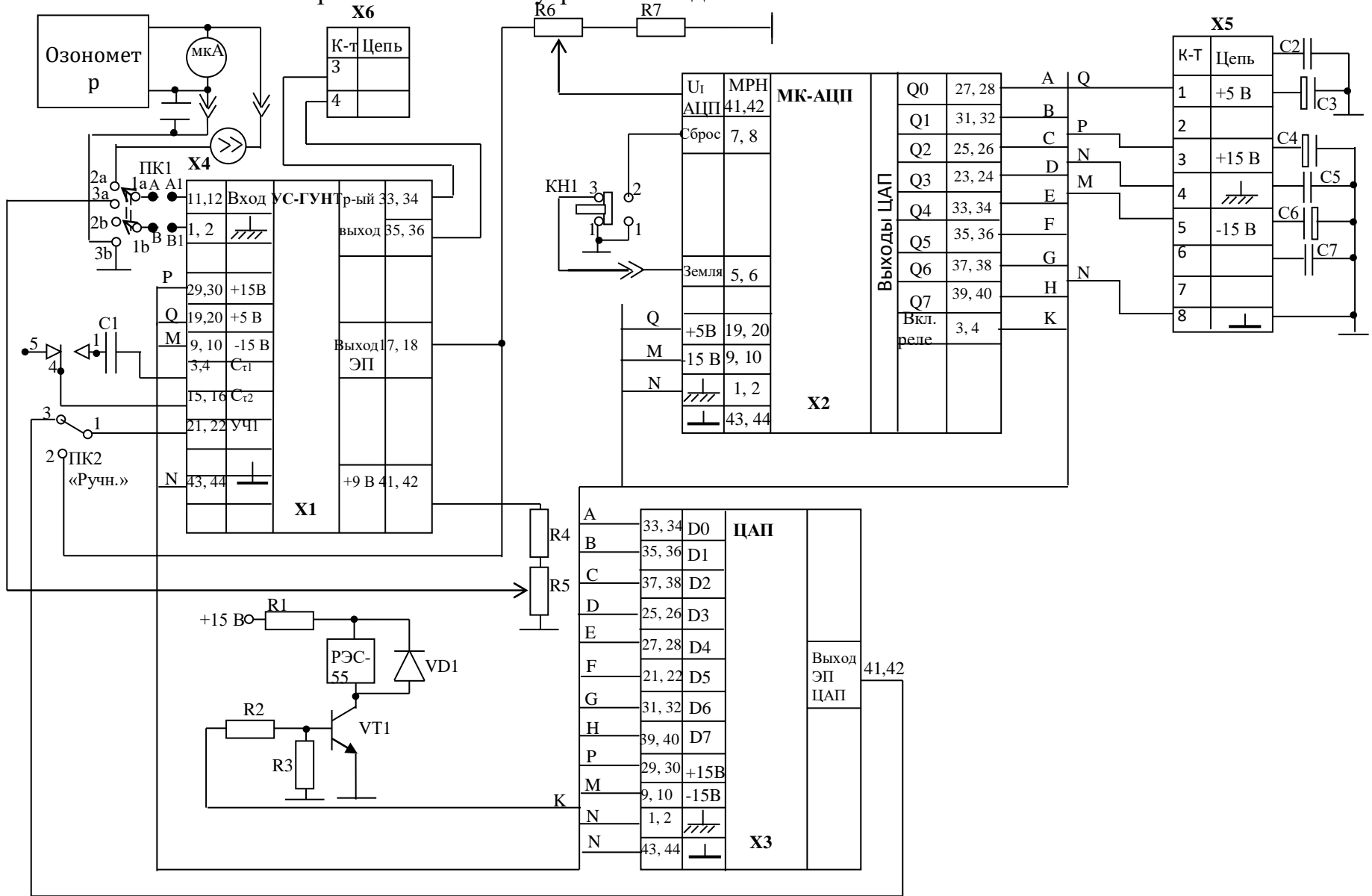
```

```

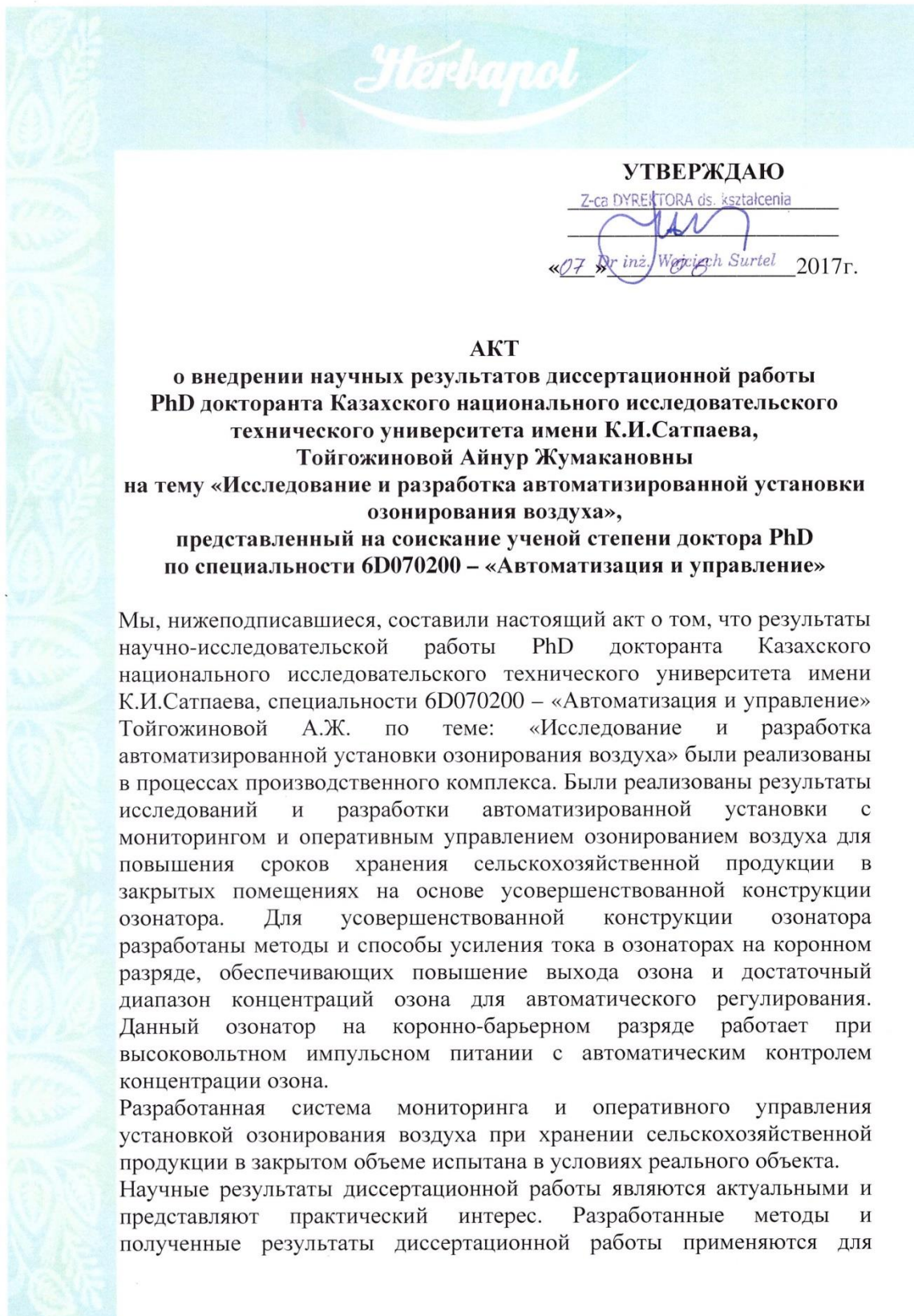
byte low=EEPROM.read(16);
return(high<<8)+low;
}
SR-4M=constQ;
int read SR-7M;
{
byte high=EEPROM.read(21);
byte low=EEPROM.read(22);
return(high<<8)+low;
}
constT=SR-7M/=10000;
constT=counter;
break;
goto Workozon;{
default;
goto STOP
}
Workozon; //Рабочая программа озонирования закрытого объема.
void loop(){
ozonr1=analogRead(sensor Pin); //Считываем значение аналогового напряжения с озонметра
map(ozonr1,0,1023,0,255); //Преобразуем масштаб 10-разрядного АЦП в 8-разрядный код ШИМ
if(ozonr1==constQ){ //Если входное значение равно заданному, то переход
delay(100); // после задержки в 100 мсек к программе временной задержки Taimer1.
goto Taimer1;
if(ozonr1>constQ){
if(byte chim=128, chim --) //Уменьшаем коэффициент заполнения ШИМ
if(chim==0) //Равен ли коэффициент заполнения ШИМ -0 ?
digitalWrite(RELE,HIGH); //Подключается дополнительный конденсатор С2
analogWrite(contrGUN, chim) //Запись нового значения в регистр ШИМ
goto Taimer1:
if(ozonr1<constQ){
if(byte chim=128, chim++)}
if( chim==255){
digitalWrite(RELE,LOW);
analogWrite(contrGUN, chim);}
goto Taimer1;
Taimer1
Delay (10000);
counter(--); //Уменьшаем значение счетчика времени на 1
if(counter==0) //Равно ли содержимое счечика -0
goto Stop} // да
Workozon; // нет, переход к рабочей программе облучения.

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Электрическая схема внутренних соединений БАРЧ



ПРИЛОЖЕНИЕ В – Акт внедрения результатов диссертационной работы



УТВЕРЖДАЮ

Z-ca DYREKTORA ds. kształcenia

«07» Dr inż. Wojciech Surtel 2017г.

АКТ

**о внедрении научных результатов диссертационной работы
PhD докторанта Казахского национального исследовательского
технического университета имени К.И.Сатпаева,
Тойгожиновой Айнур Жумакановны
на тему «Исследование и разработка автоматизированной установки
озонирования воздуха»,
представленный на соискание ученой степени доктора PhD
по специальности 6D070200 – «Автоматизация и управление»**

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской работы PhD докторанта Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И.Сатпаева, специальности 6D070200 – «Автоматизация и управление» Тойгожиновой А.Ж. по теме: «Исследование и разработка автоматизированной установки озонирования воздуха» были реализованы в процессах производственного комплекса. Были реализованы результаты исследований и разработки автоматизированной установки с мониторингом и оперативным управлением озонированием воздуха для повышения сроков хранения сельскохозяйственной продукции в закрытых помещениях на основе усовершенствованной конструкции озонатора. Для усовершенствованной конструкции озонатора разработаны методы и способы усиления тока в озонаторах на коронном разряде, обеспечивающих повышение выхода озона и достаточный диапазон концентраций озона для автоматического регулирования. Данный озонатор на коронно-барьерном разряде работает при высоковольтном импульсном питании с автоматическим контролем концентрации озона.

Разработанная система мониторинга и оперативного управления установкой озонирования воздуха при хранении сельскохозяйственной продукции в закрытом объеме испытана в условиях реального объекта.

Научные результаты диссертационной работы являются актуальными и представляют практический интерес. Разработанные методы и полученные результаты диссертационной работы применяются для

предотвращения преждевременной порчи и сохранения пищевой ценности продуктов питания в пищевой промышленности (овошехранилище).

Испытание разработанного устройство показали правильность выбранного принципа работы устройства и его работоспособность в реальных условиях при многоточечном измерении концентраций озона и концентраций микроорганизмов с использованием микропроцессора. Устройство обеспечивает автоматический контроль и регулирование концентраций озона в закрытом объеме при высокой чувствительности и надежности результатов измерений, что достигается автоматизацией измерения и регистрацией данных микропроцессором и электронной системой регулирования работой озонатора.

**От Люблинского
политехнического университета,
г.Люблин, Польша:**

**директор института электроники
и информационных технологий,
доктор технических наук,
профессор**

PROFESSOR

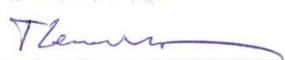
Institutu Elektroniki i Techniki Informatyki

Waldemar Wojcik

Prof. dr hab. inż. Waldemar Wojcik

от предприятия

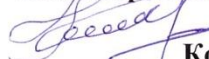
WALDEMAR



Prof. dr hab. inż. Waldemar Wojcik

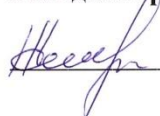
**От КазННТУ имени
К.И.Сатпаева**

**Научный руководитель,
кандидат технических наук,
ассоциированный профессор**



Кошимбаев Ш.К

PhD докторант



Тойгожинова А.Ж.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Акт производственных испытаний автоматизированной установки озонирования воздуха

«Утверждаю»

зам. генерального директора

по научной работе КазНИИ

рисоводства им. И.Жахаева

д.с.-х.н., чл.корр. АСХН РК

Тектамысов А.М.



АКТ

производственных испытаний автоматизированной установки озонирования воздуха в овощехранилище продовольственного рынка «Арзан» г. Кызылорда.

1. Производственные испытания осуществлялись в соответствии с диссертационной темой докторанта 3-го года обучения НАО КазНИТУ им. К.И. Сатпаева специальности 6D070200 – Автоматизация и управление Тойгожиновой Айнур Жумахановной «Исследование и разработка автоматизированной установки озонирования воздуха»

2. Производственные испытания проводились в овоцехранилище продовольственного рынка «Арзан» г. Кызылорда.

3. Условия проведения испытаний: типовое хранилище с активной вентиляцией объемом 100 тонн.

4. Объем производственных испытаний: обработка 500 кг картофеля, 300 кг моркови.

5. Сроки проведения: 11.2016 – 02.2017.

6. Рекомендуемые варианты: согласно данным по таблице 1 рекомендуется обрабатывать продукты озонозооушной смесью с автоматическим контролем концентрации озона в закрытом объеме при постоянстве концентрации озона за установленное время.

Таблица 1

Продукт	Концентрация озона, мг/м.куб	Время озонирования в сутки, час	Количество обработок в неделю
Морковь	7	4	3 дня подряд 1 раз в месяц
Картофель	3,5	3	3

1. Результаты учета, характеризующие эффективность применения автоматизированной установки озонирования для дезинфекции и санации воздуха в

производственных помещениях пищевой промышленности при анализе хранимого картофеля и моркови получены данные, приведенные в таблице 2.

Таблица 2

Режим	Конц. О ₃ , мг/м ³	Выход станд. картофеля, %	Потери всего, %	В том числе			
				Сухая гниль, %	Мокрая гниль, %	Ростки, %	Естественная убыль, %
Контроль (картофель)	–	87,0	13,0	2	1	2,5	7,5
Экспозиция (картофель)	3,5	95,0	5,0	0,5	0,1	1,0	3,4
Контроль (морковь)	–	82,5	17,5	3,5	3	3	8
Экспозиция (морковь)	7	90,0	10	2,5	1,5	1	5

Полученные результаты показывают, что обработка клубней картофеля озонородушной смесью снизила общие потери до 8%, в том числе убыль массы – до 3,4% в сравнении с контролем. Обработка моркови дали следующие результаты: общие потери снижены на 7,5 %, в том числе убыль массы 5% в сравнении с контролем. Следовательно, производственные испытания подтвердили основные результаты, полученные при лабораторных испытаниях в холодильных камерах с температурой хранения 2 ÷ 4 °С.

2. Для снижения потерь при хранении картофеля рекомендуется обрабатывать озонородушной смесью с концентрацией 3,5 мг/м³ ежемесячно с экспозицией 36 часов (температура хранения 2 ÷ 4 °С), для моркови обрабатывать озонородушной смесью с концентрацией 7 мг/м³ с экспозицией 12 часов 3 дня подряд 1 раз в месяц. При этом должен обеспечиваться автоматический выбор режима озонирования закрытого объема в соответствии обрабатываемому продукту, когда при каждом режиме поддерживается постоянство концентрации озона в объеме за установленное время.

3. По данным разработчика автоматизированная установка озонирования воздуха используемой конструкции, рассчитан на обработку секции вместимостью до 25 тонн продукции. Ожидаемый экономический эффект за расчетный период с 11.2016 по 02.2017 составит: для картофеля (25 тонн) – 248 228 тенге, для моркови (25 тонн) – 202 130 тенге за период хранения.

Ответственные исполнители производственных испытаний:

Мл.научн.сотр.отдела
овощебахчеводства и картофеля
КазНИИ рисоводства им. И.Жахаева  Карабалыкова Ж.

Зав. отделом
овощебахчеводства и картофеля
КазНИИ рисоводства им. И.Жахаева  Бегалиев К.Б.

Зав кафедрой ЭЭиБЖ
КГУ им Коркыт Ата  Сыдыкова Г.К.

Докторант  Тойгожинова А.Ж.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Удостоверение автора изобретения



МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

УДОСТОВЕРЕНИЕ АВТОРА

№ 88384

*Настоящим удостоверяется, что Тойгожинова Айнур Жумакановна
и Бахтаев Шабден Абуович; Сейтимбетов Айдос Маликович; Сыдыкова
Гульнар Кудайбергеновна; Коджабергенова Асем Кунтуаровна*

является(ются) автором(ами) изобретения

(11) 30010

(54) Устройство для автоматического контроля и регулирования
концентраций озона в закрытом объеме

(73) *Патентообладатель:* Некоммерческое акционерное общество
"Алматинский университет энергетики и связи"

(21) 2014/0933.1

(22) 09.07.2014

Заместитель министра юстиции
Республики Казахстан

Э. Азимова



МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

УДОСТОВЕРЕНИЕ АВТОРА

№ 98096

*Настоящим удостоверяется, что Тойгожинова Айнур Жумакановна (KZ)
и Бахтаев Шабден Абуович (KZ); Кошимбаев Шамиль Кошимбаевич (KZ);
Боканова Алия Абылгазиевна (KZ); Сыдыкова Гульнар
Кудайбергеновна (KZ)*

является(ются) автором(ами) полезной модели

(11) 2185

(54) Озонирующий элемент

(73) *Патентообладатель:* Некоммерческое акционерное общество
"Алматинский университет энергетики и связи" (KZ)

(21) 2016/0517.2

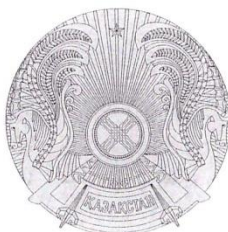
(22) 19.09.2016

Заместитель министра юстиции
Республики Казахстан

Э. Азимова

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж – Предпатент. Способ усиления электрического тока в озонаторе

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН



(19) КОМИТЕТ ПО ПРАВАМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
МИНИСТЕРСТВА ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

(12) **ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПАТЕНТ**

(11) **№ 19274**
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

(54) НАЗВАНИЕ: СПОСОБ УСИЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В ОЗОНАТОРЕ

(73) ПАТЕНТООБЛАДАТЕЛЬ: Бахтаев Шабден Абуович

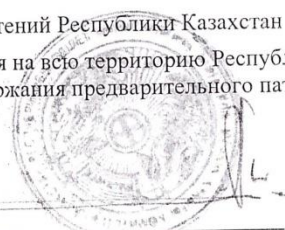
(72) АВТОР (АВТОРЫ): Бахтаев Шабден Абуович; Дюсебаев Марат Канафиевич;
Нурпеисова Куляш Махметовна; Тойгожинова Айнура Жумақановна

(21) Заявка № 2006/0588.1

(22) Дата подачи заявки 16.05.2006

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Республики Казахстан 25.01.2008
Действие предварительного патента распространяется на всю территорию Республики Казахстан при условии своевременной оплаты поддержания предварительного патента в силе

Председатель Комитета по правам
интеллектуальной собственности
Министерства юстиции Республики Казахстан



М.О. Айкенов

Сведения о внесении изменений приводятся на отдельном листе в виде приложения к настоящему предварительному патенту



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

(19) KZ (13) A (11) 19274
(51) C01B 13/11 (2006.01)
H03H 21/00 (2006.01)

КОМИТЕТ ПО ПРАВАМ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
МИНИСТЕРСТВА ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМУ ПАТЕНТУ

- (21) 2006/0588.1
(22) 16.05.2006
(45) 15.04.2008, бюл. № 4
(72) Бахтаев Шабден Абуович; Дюсебаев Марат
Канафиевич; Нурпенсова Куляш Махметовна;
Тойгожинова Айнур Жумахановна
(73) Бахтаев Шабден Абуович (KZ)
(56) Предпатент РК № 12180, кл. С 01 В 13/01,
13/11, 2002
(54) СПОСОБ УСИЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕС-
КОГО ТОКА В ОЗОНАТОРЕ
(57) Изобретение может быть использовано в
промышленности для озонной обработки
атмосферного воздуха в производственных
помещениях.

Задачей изобретения являлось разработка
способа усиления электрического тока в озонаторе,
обеспечивающего высокую эффективность выхода
озона при малых удельных энергозатратах.

Достижимым техническим результатом является
применение свойств электрического ветра,
возникающего в условиях коронного разряда,
позволившее упростить конструкцию озонатора и
получить малые удельные энергозатраты на 1 г
озона.

Технический результат достигается тем, что
озонирующий элемент помещают в полукрытую
камеру, открытая часть которой расположена в
направлении электрического ветра, возникающего в
условиях коронного разряда.

(19) KZ (13) A (11) 19274

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН



(19) КОМИТЕТ ПО ПРАВАМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
МИНИСТЕРСТВА ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

(12) **ИННОВАЦИОННЫЙ ПАТЕНТ**

(11) № 24373
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

(54) НАЗВАНИЕ: Озонатор

(73) ПАТЕНТООБЛАДАТЕЛЬ: Некоммерческое акционерное общество "Алматинский университет энергетики и связи"

(72) АВТОР (АВТОРЫ): Бахтаев Шабден Абуович; Сыдыкова Гульнар Кудайбергеновна;
Тойгожинова Айнур Жумакановна; Амантаев Канат Омирзакулы

(21) Заявка № 2010/1074.1

(22) Дата подачи заявки 25.08.2010

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Республики Казахстан 27.06.2011 г.
Действие инновационного патента распространяется на всю территорию Республики
Казахстан при условии своевременной оплаты поддержания инновационного патента в силе

Председатель Комитета
по правам интеллектуальной собственности
Министерства юстиции Республики Казахстан



Абдрахим Н.Е.

Сведения о внесении изменений приводятся на отдельном листе в виде приложения к настоящему инновационному патенту



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

(19) KZ (13) A4(11) 24373
(51) C01B 13/11 (2010.01)

КОМИТЕТ ПО ПРАВАМ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
МИНИСТЕРСТВА ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ИННОВАЦИОННОМУ ПАТЕНТУ

(21) 2010/1074.1

(22) 25.08.2010

(45) 15.08.2011, бюл. № 8

(72) Бахтаев Шабден Абуович; Сыдыкова Гульнар
Кудайбергеновна; Тойгожинова Айну
Жумакановна; Амантаев Канат Омирзакулы

(73) Некоммерческое акционерное общество
"Алматинский университет энергетики и связи"

(56) Полезная модель РК № 471, кл. C01B 13/11,
2009

(54) **ОЗОНАТОР**

(57) Изобретение относится к классу озонаторов для
озонирования атмосферного воздуха и может быть
использовано для озоноподготовки
производственных, служебных и бытовых
помещений.

Задачей предлагаемого изобретения является
разработка озонатора, обеспечивающего высокую
эффективность выхода озона при малых удельных
энергозатратах.

При этом основным достигаемым техническим
результатом будет применение свойств
электрического ветра, возникающего в условиях
коронного разряда, что позволяет упростить
конструкцию озонатора и получить малые удельные
энергозатраты на 1 г. озона.

Это достигается тем, что в озонаторе,
содержащем последовательно расположенные
озонирующие элементы, выполненные в виде
"коронирующая игла - плоская металлическая
сетка", которые помещены в полузакрытую камеру
и расположены осесимметрично в направлении
электрического ветра, возникающего в сторону
открытой части камеры, согласно изобретению,
озонатор содержит озонирующие элементы,
расположенные вблизи закрытой части камеры
озонатора и дополнительно коронирующие
электроды, расположенные вблизи открытой части
камеры по краю круга сечения узкой части
патрубка.

(19) KZ (13) A4(11) 24373

ПРИЛОЖЕНИЕ И – Инновационный патент. Устройство для контроля и регулирования концентраций озона в закрытом объеме.



(19) МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

(12) **ИННОВАЦИОННЫЙ ПАТЕНТ**

(11) № 30010

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

(54) **НАЗВАНИЕ:** Устройство для автоматического контроля и регулирования концентраций озона в закрытом объеме

(73) **ПАТЕНТООБЛАДАТЕЛЬ:** Некоммерческое акционерное общество "Алматинский университет энергетики и связи"

(72) **АВТОР (АВТОРЫ):** Бахтаев Шабден Абуович; Тойгожинова Айнуур Жумакановна; Сейтимбетов Айдос Маликович; Сыдыкова Гульнар Кудайбергеновна; Коджабергенова Асем Кунтуаровна

(21) Заявка № 2014/0933.1

(22) Дата подачи заявки 09.07.2014

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Республики Казахстан 19.05.2015г.

Действие инновационного патента распространяется на всю территорию Республики Казахстан при условии своевременной оплаты поддержания инновационного патента в силе.

Заместитель министра юстиции
Республики Казахстан

Э. Азимова

Сведения о внесении изменений приводятся на отдельном листе в виде приложения к настоящему инновационному патенту



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

(19) KZ (13) A4 (11) 30010
(51) G01N 27/70 (2006.01)

МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ИННОВАЦИОННОМУ ПАТЕНТУ

(21) 2014/0933.1

(22) 09.07.2014

(45) 15.06.2015, бюл. №6

(72) Бахтаев Шабден Абуович; Тойгожинова Айнуур
Жумакановна; Сейтимбетов Айдос Маликович;
Сыдыкова Гульнар Кудайбергеновна;
Коджабергенова Асем Кунтуаровна

(73) Некоммерческое акционерное общество
"Алматинский университет энергетики и связи"

(56) Инновационный патент KZ 20581, 15.12.2008

(54) **УСТРОЙСТВО ДЛЯ
АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И
РЕГУЛИРОВАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ОЗОНА
В ЗАКРЫТОМ ОБЪЕМЕ**

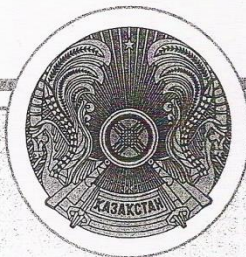
(57) Изобретение может быть использовано для автоматического выбора режима озонирования закрытых помещений агропромышленного комплекса (в холодильниках и овощехранилищах), когда в закрытом объеме поддерживается постоянство концентрации озона за установленное время.

Задачей предлагаемого изобретения является разработка устройства для автоматического контроля и регулирования концентраций озона в закрытом объеме, обеспечивающая выбор режима

озонирования объема при постоянстве концентрации озона за установленное время. Достижимым техническим результатом является обеспечение автоматического выбора режима озонирования закрытого объема, когда при каждом режиме поддерживается постоянство концентрации озона в объеме за установленное время.

Устройство для автоматического контроля и регулирования концентраций озона, в закрытом объеме содержит коронирующие иглы, выполненные в виде игл на сетках, направлены в противоположные стороны и подсоединены к разным полюсам источника питания, а внешние электроды расположены напротив коронирующих игл, а также содержит озонометры, количество которых определяется опытным путем, в соответствии с объемом закрытого помещения, микропроцессор, предназначенный для работы по заданной программе при выборе режима по концентрации озона и по времени озонирования закрытого объема и импульсный озонатор, обеспечивающий электронное регулирование выхода озона по частоте высоковольтных импульсов.

(19) KZ (13) A4 (11) 30010



(19) МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ПАТЕНТ

(11) № 2185

(12) НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

(54) **НАЗВАНИЕ:** Озонирующий элемент

(73) **ПАТЕНТООБЛАДАТЕЛЬ:** Некоммерческое акционерное общество
"Алматинский университет энергетики и связи" (KZ)

(72) **АВТОР (АВТОРЫ):** Бахтаев Шабден Абуович (KZ); Кошимбаев Шамиль
Кошимбаевич (KZ); Боканова Алия Абылгазиевна (KZ); Сыдыкова Гульнар
Кудайбергеновна (KZ); Тойгожинова Айнуур Жумакановна (KZ)

(21) Заявка № 2016/0517.2

(22) Дата подачи заявки: 19.09.2016

Зарегистрирован в Государственном реестре полезных моделей Республики Казахстан
28.04.2017.

Действие патента распространяется на всю территорию Республики Казахстан при
условии своевременной оплаты поддержания патента в силе.

Заместитель министра юстиции
Республики Казахстан

Э. Азимова

Сведения о внесении изменений приводятся на отдельном листе в виде приложения к настоящему патенту



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

(19) KZ (13) U (11) 2185
(51) C01B 13/11 (2006.01)

МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21) 2016/0517.2

(22) 19.09.2016

(45) 30.05.2017, бюл. №10

(72) Бахтаев Шабден Абуович; Кошимбаев Шамиль Кошимбаевич; Боканова Алия Абылгазиевна; Сыдыкова Гульнар Кудайбергеновна; Тойгожинова Айнура Жумахановна

(73) Некоммерческое акционерное общество "Алматинский университет энергетики и связи"

(56) KZ №10422, 16.10.2006

(54) **ОЗОНИРУЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ**

(57) Полезная модель относится к классу озонирующих элементов для озонирования атмосферного воздуха и может быть использована для дезинфекции и санации воздуха в производственных и служебных помещениях или для обеззараживания питьевых и сточных вод.

Задача полезной модели является разработка озонирующего элемента на коронно-барьерном разряде при малых межэлектродных расстояниях.

Достижимым техническим результатом будет малогабаритность озонирующего элемента, что обеспечивается применением малых межэлектродных расстояний, приводящих к

значительному снижению величины напряжения питания.

Озонирующий элемент, содержащий диэлектрическую трубку (барьер), на которую спирально намотано коронирующая проволока с шагом спирали большим, чем толщина стенки трубки, внешний электрод в виде цилиндра, расположенный соосно внутри трубки, причем озонатор снабжен двухполупериодным выпрямителем тока и камерой для нейтрализации ионов озона, выполненный из двух металлических сеток, подсоединенных к коронирующему электроду, диэлектрический корпус, в виде цилиндра с окнами для свободного доступа воздуха, диэлектрический стержень, соосно расположенный в корпусе, на котором намотана под углом наклона 45° спираль из медной проволоки с эмалевым покрытием (барьер) с просветом между витками не менее диаметра проволоки, коронирующая проволока, расположенная сверху этой намотки выполнена с обратной спиральной намоткой по сравнению с первой намоткой, но с тем же углом обратного наклона.

(19) KZ (13) U (11) 2185

ПРИЛОЖЕНИЕ Л – Справка о выполнении научно-экспериментальных работ диссертационного исследования



LUBLIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Faculty of Electrical Engineering & Computer Science
Institute of Electronics and Information Technology



ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, Poland; tel.: +48 81 538 43 09; fax: +48 81 538 43 12; e-mail: ieti@pollub.pl; http://ieti.pollub.pl

СПРАВКА

о выполнении научно-экспериментальных работ диссертационного исследования

докторанта 2-го года обучения ИИТТ НАО КазННТУ им. К.И. Сатпаева специальности 6D070200 – Автоматизация и управление Тойгожиновой Айнур Жумакановной по теме «Исследование и разработка автоматизированной установки озонирования воздуха»

Данная справка подтверждает, что в период прохождения 2 научной стажировки с 07.06.2016 г. по 08.07.2016г. в Люблинском политехническом университете, г. Люблин (Польша) докторантом Тойгожиновой А.Ж. проведены следующие научно-экспериментальные работы диссертационного исследования:

1. В результате проведенных исследований разработан и испытан озонатор высоковольтных импульсов ОВИ-1 работающий в коронно-барьерном разряде.

Для испытаний в качестве озонатора взят импульсный озонатор, разработанный авторами (Доклады НАН РК, 2013, №2, С.71-80). Данный озонатор легко управляется блоком БАРЧ (блок автоматического регулирования частоты) и имеет достаточно широкий диапазон изменения выходных характеристик по озону. Например, производительность по озону можно менять от 0,176 до 0,453 г/час, а энергетический выход озона – от 13,87 до 55,5 г/кВт·ч. В качестве озонметра было использовано устройство Solar модель 520. Этот прибор использует стандартную конфигурацию ВСЕМИРНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ для измерения озона.

Результаты испытания сведены в таблицы 1,2.

Таблица 1 – Зависимость выхода озона от напряжения

№	U _{ЛАТР} , В	f, Гц	t, мин	m, мг/л; прокачка 35л за 10 мин	O ₃ , г/ч	O ₃ , г/кВтч
1	80	2000	10	9,6	0,201	56,81
2	100	2000	10	14,4	0,252	54,54
3	120	2000	10	19,2	0,403	48,54
4	140	2000	10	26,4	0,554	47,03
5	150	2000	10	28,8	0,705	44,9

Таблица 2 – Зависимость выхода озона от частоты импульсов

№	f, Гц	U _{ЛАТР} , В	t, мин	m, мг/л; прокачка 35л за 10 мин	O ₃ , г/ч	O ₃ , г/кВтч
1	150	125	10	8,4	0,176	–
2	1000	125	10	12	0,252	55,5
3	2000	125	10	21,6	0,453	49,8
4	3000	125	10	20,4	0,428	31,42
5	4000	125	10	12	0,252	13,87

2. Разработана система автоматического регулирования (САР) концентрации озона в рабочем помещении. Составлен алгоритм и программа управления МК для основного режима работы БАРЧ (блок автоматического регулирования частоты). Составлена электрическая схема внутренних соединений БАРЧ. На основе полученных данных, разработана технологическая схема



LUBLIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Faculty of Electrical Engineering & Computer Science
Institute of Electronics and Information Technology



ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, Poland; tel.: +48 81 538 43 09; fax: +48 81 538 43 12; e-mail: ieti@pollub.pl; http://ieti.pollub.pl

озонирования для дезинфекции и санации атмосферного воздуха в производственном помещении.

Совместное испытание озонатора и озонометра показали правильность выбранного принципа работы устройства и его работоспособность в реальных условиях при многоточечном измерении концентраций озона с использованием микропроцессора.

В целом, испытываемое устройство обеспечивает автоматический контроль и регулирование концентраций озона в закрытом объеме при высокой чувствительности и надежности результатов измерений, что достигается автоматизацией измерения и регистрации данных микропроцессором и электронной системой регулирования работой озонатора.

Зарубежный научный руководитель
д.т.н., профессор

Waldemar Wojcik

POLITECHNIKA LUBELSKA
Instytut Elektroniki i Techniki Informatycznych
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A
tel.: (81) 53 84 309, fax: (81) 53 84 312

DYREKTOR
Instytutu Elektroniki i Techniki Informatycznych

Prof. dr hab. inż. Waldemar Wójcik
07.07.2016 r.