На правах рукописи



Фарзалиев Эмиль Физули-Оглы

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ОБРАБОТКИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СЛАБОПОЛЯРНЫХ И НЕПОЛЯРНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.3.3 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск.

Научный руководитель**:** **Филиппенко Николай Григорьевич,** кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов» ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск

Официальные оппоненты: **Мурыгин Александр Владимирович,** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационно-управляющие системы» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск

Литовка Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов

Защита состоится 24.12.2026 в 14-30 часов на заседании диссертационного совета 44.2.002.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, дом 15, аудитория А-803, тел. 8(3952)63-83-94, e-mail: diss_sovet@irgups.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» и на сайте https://www.irgups.ru.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, дом 15, аудитория А-803, ученому секретарю диссертационного совета 44.2.002.01

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор Л.В. Аршинский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Полимерные материалы в современной промышленности получили широкое распространение, в связи с этим последние десятилетия объемы производства и потребления пластмасс выросли до сотен миллионов тонн в год, при этом на упаковку приходится до 40 – 45% мирового потребления полимеров. Упаковочная отрасль является также крупнейшим потребителем полимеров в России, где доминируют пленочные материалы на основе полиэтилена и полипропилена. Сохранность продукции при транспортировке и хранении, особенно экспортируемых пиломатериалов, в значительной степени определяется качеством и надежностью защитных и упаковочных пленок, воспринимающих механические, климатические и радиационные (УФ) воздействия. В практике отечественных предприятий отмечаются случаи преждевременного разрушения упаковочных пленок, приводящие к росту брака и штрафным санкциям со стороны потребителей.

Одной из типичных причин снижения прочности и долговечности пленочных материалов является повышенное влагосодержание полимерного сырья перед переработкой, приводящее к образованию пористости и внутренних дефектов структуры, падению прочности при растяжении и ударной вязкости. Традиционные методы сушки полимеров (механические, конвективные и кондуктивные) либо не обеспечивают достижение нормативных значений остаточной влажности, либо сопровождаются значительной продолжительностью процесса и риском термической деструкции материала. На этом фоне высокочастотная (ВЧ) электротермия, основанная на объемном диэлектрическом нагреве, представляет собой перспективное направление повышения эффективности подготовки сырья, однако особенности ВЧ-обработки многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных систем изучены недостаточно.

Дополнительную сложность создает низкая степень автоматизации существующих технологических процессов: контроль качества сырья и режимов ВЧ-обработки зачастую носит субъективный характер, параметры процесса задаются по усредненным регламентам и не учитывают реальное состояние материала, что приводит к нестабильности свойств продукции. В этих условиях актуальной научно-практической задачей является разработка методов измерения электрофизических параметров слабополярных и неполярных полимеров, создание адекватной математической модели ВЧ-нагрева многокомпонентных систем и построение автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) высокочастотной сушки, обеспечивающей требуемое качество упаковочных пленок.

Степень разработанности проблемы. Существенный вклад в развитие теории и практики высокочастотной электротермии внесли работы отечественных и зарубежных исследователей, в том числе: Архангельский Ю.С., Буторин Д.В., Донской С.Н., Калганова С.Г., Киселева Т.Ф., Княжевская Г.С., Коновалов Н.П., Крыжановский В.К., Лившиц А.В., Марков А.В., Павлов Н.Н., Румынский А.В., Тагер А.А., Трофимов Н.В., Федорова И.Г., Юленец Ю.П. и др., посвященные описанию физических механизмов диэлектрического нагрева, построению математических моделей ВЧ-процессов и созданию АСУ ТП для сушки и термообработки полярных полимеров. Во многих исследованиях используются уравнения нестационарной теплопроводности с внутренними источниками тепла и граничными условиями третьего и четвертого рода, предложены различные схемы расположения электродов и алгоритмы управления режимом нагрева.

Целью диссертационной работы является: повышение энергоэффективности обработки сырья и эксплуатационных свойств пленочных изделий из многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов за счет автоматизации управления технологическим процессом их ВЧ-сушки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ современного состояния полимерной индустрии, методов производства защитных и упаковочных пленочных материалов, а также существующих систем управления процессом ВЧ-обработки полимеров.
2. Исследовать процесс высокочастотной совместной обработки слабополярных и неполярных термопластичных материалов и устройство его реализации как объект управления.

3. Разработать автоматизированный модуль определения и оценки электрофизических параметров слабополярных и неполярных полимеров (АСНИ ЭФП).

4. На основе исследования ВЧ-обработки сформировать комплекс информативных контролируемых параметров с целью идентификации процесса.

5. Разработать математическую модель нагрева увлажненных многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов в ВЧ-поле.

6. Определить последовательность этапов организации технологического процесса ВЧ-сушки и сформировать методологическую основу их реализации.

7. Разработать структуру, алгоритмы АСУ ТП ВЧ-сушки, модуля автоматизированного определения электрофизических параметров полимерных материалов с соответствующим программным обеспечением.

8. Провести промышленную апробацию разработанной АСУ ТП ВЧ-сушки многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов в производственный процесс.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Предложены:

- автоматизированный метод идентификации процесса ВЧ-сушки слабополярных и неполярных полимерных материалов, определяющий использование терминальной системы управления при построении АСУ ВЧ, в отличие от экстремальных систем при обработке полярных и сильнополярных полимеров, позволяющий реализовывать процесс ВЧ-сушки;

- новый метод идентификации состояния увлажненности полимеров, позволяющий оценить условия транспортировки и хранения полимерного сырья по параметрам процесса ВЧ-обработки.

2. Предложена математическая модель процесса высокочастотной сушки многослойных полимерных материалов, отличающаяся от известных моделей применением к насыпному многокомпонентному сырью упаковочного назначения, учетом насыпной плотности полимерных материалов и включением нового параметра (скорость воздушного потока вентилятора обдува), непосредственно используемого в алгоритмах автоматизированного управления технологическим процессом, позволяющая исследовать тепловые процессы в слабополярных и неполярных полимерах с целью определения рациональных режимов ВЧ-обработки и чередования слоев с учетом конвективной теплоотдачи.

3. Разработан алгоритм функционирования автоматизированной системы научных исследований электрофизических параметров (АСНИ ЭФП) полимеров, реализующий резонансный метод, позволяющий определять зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь полимерных материалов от температуры и влагосодержания, отличающийся использованием модернизированной измерительной ячейки с регулируемой температурой исследуемого образца и реализацией автоматизированного процесса настройки колебательного контура на резонанс.

4. Разработан алгоритм работы автоматизированной системы управления процессом высокочастотной обработки многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов, позволяющий повысить качественные свойства сырья при производстве пленочных изделий из полимерных материалов, отличающийся использованием комплекса контролируемых параметров процесса ВЧ-обработки слабополярных и неполярных полимерных материалов в составе: анодный ток ВЧ-генератора, температуры нижней и верхней поверхностей обрабатываемого полимерного массива, напряжение рабочего конденсатора высокочастотного оборудования и взаимосвязей между ними.

Теоретическую значимость составляют: полученные зависимости ε', ε'', $\mathrm{tg}\delta$ от влажности и температуры для полипропилена и бимодала в различных состояниях увлажнения, положенных в основу формирования алгоритмов управления процессами ВЧ-обработки; сформированный комплекс контролируемых параметров процесса ВЧ-обработки слабополярных и неполярных полимерных материалов, позволяющий решать задачи идентификации параметров увлажненности полимеров; математическая модель высокочастотного нагрева увлажненных многокомпонентных полимерных материалов с учетом конвекции, как составляющей части технологического процесса; сформированный критерий выбора схемы чере-

дования полимеров по слоям для организации автоматизированного процесса ВЧ-сушки полимерных смесей.

Практическая значимость работы заключается в разработке: автоматизированного модуля определения и оценки электрофизических параметров полимеров (АСНИ ЭФП), как составной части автоматизированной системы научных исследований высокочастотной обработки (АСНИ ВЧ); многоуровневого алгоритма АСУ ЭФП, обеспечивающего непрерывный мониторинг параметров ВЧ-генератора и аварийное отключение при превышении их пороговых значений; программного обеспечения для автоматизированной обработки экспериментальных данных, создания паспортов партий полимерного сырья и формирования банка материалов с электрофизическими характеристиками; алгоритм параметрической идентификации процесса ВЧ-сушки слабополярных и неполярных полимерных материалов с защитно-регулирующими контурами; АСУ ТП высокочастотной сушки слабополярных и неполярных полимерных материалов.

Промышленное внедрение разработанной автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) было осуществлено на предприятии ООО «ТД ЗПМ» (г. Ангарск).

Объектом исследования является: процесс высокочастотного нагрева слабополярных и неполярных полимеров и устройство его реализации как объект управления, используемых при производстве защитных и упаковочных пленок, в условиях промышленной ВЧ-установки.

Предметом исследования являются: модели и алгоритмы, описывающие и использующие связи между режимами ВЧ-воздействия, измеряемыми электрическими и температурными параметрами и состоянием многокомпонентного сырья, для построения автоматизированного управления процессом его термообработки.

Методология и методы исследования. Исследования проводились на основе математического моделирования с использованием метода конечных разностей, физикохимии полимерных материалов, термогравиметрии, термодинамики, электротехники и основ проектирования автоматизированных систем.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод идентификации процесса ВЧ-сушки слабополярных и неполярных полимерных материалов, основанный на использовании терминальной системы управления (по стабилизации температуры и анодного тока), в отличие от экстремальных систем, применяемых для полярных полимеров, позволяет реализовать процесс ВЧ-сушки для данного класса материалов.

2. Новый метод идентификации состояния увлажненности полимерного сырья позволяет оценить соответствие условий его транспортировки и хранения требуемым параметрам по анализу количества площадок стабилизации анодного тока генератора ВЧ-установки.

3. Математическая модель нагрева многослойной технологической системы ВЧ-сушки, отличающаяся учетом насыпной плотности многокомпонентного полимерного сырья и введением параметра учета конвективной теплоотдачи, позволяет определять рациональные режимы ВЧ-обработки и порядок чередования слоев слабополярных и неполярных полимеров.

4. Алгоритм функционирования автоматизированной системы научных исследований электрофизических параметров (АСНИ ЭФП), реализующий резонансный метод с модернизированной измерительной ячейкой и автоматизированной настройкой контура на резонанс, обеспечивает определение зависимостей ε' и $\mathrm{tg}\delta$ от температуры и влагосодержания в условиях, приближенных к реальным режимам ВЧ-сушки.

5. Алгоритм автоматизированной системы управления процессом ВЧ-обработки многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов, отличающийся использованием комплекса контролируемых параметров: анодного тока ВЧ-генератора $I_{\text{а}}$, температур нижней и верхней поверхностей полимерного массива $T_{\text{н}}$ и $T_{\text{в}}$, напряжения рабочего конденсатора $U_{\text{раб}}$ и взаимосвязей между ними, обеспечивает повышение качественных свойств сырья при производстве пленочных изделий.

Достоверность полученных научных результатов обоснована: корректным использованием методов классической теории автоматического управления, электродинамики, основ физикохимии полимеров; использованием существующих методов численного анализа и методов аппроксимации; согласованностью теории и результатов экспериментальных исследований (в т. ч. результатов экспериментальных исследований процессов высокочастотной электротермии сторонних авторов).

Реализация результатов работы. Основные результаты работ были внедрены на предприятии полимерной отрасли (ООО «ТД ЗПМ» г. Ангарск). Экономический эффект от внедрения составил 970 347 руб. в год. Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской работы «Автоматизация управления процессами высокочастотной обработки слабополярных и неполярных полимерных материалов», зарегистрированной «ФГБОУ ВО ИрГУПС», рег. № - 126032719411-1 от 27.03.2026 г.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на VI Всероссийской научно-практических конференции «Наука и молодежь» (Иркутск, 2020 г.), на VII Всероссийской научно-практических конференции «Наука и молодежь» (Иркутск, 2021 г.).

В работах, опубликованных в соавторстве, которые приведены в конце автореферата, лично автором получены следующие результаты: [6-9] – получение экспериментальных данных для написания программ; [10] – сбор статистической информации; [11,12, 15] – выполнение экспериментов для построения графиков функций; [13,14, 16] – структурирование текста, обработка расчетных данных; [17] – построение алгоритмов и описание к ним.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 17 научных работах, из них 4 работы в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК, 1 статья в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus. Получен 1 патент на изобретение, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, имеющего 107 наименований, и шести приложений на 34 листах. Общий объем составляет 222 страницы машинописного текста, содержащих 73 рисунка и 9 таблиц.

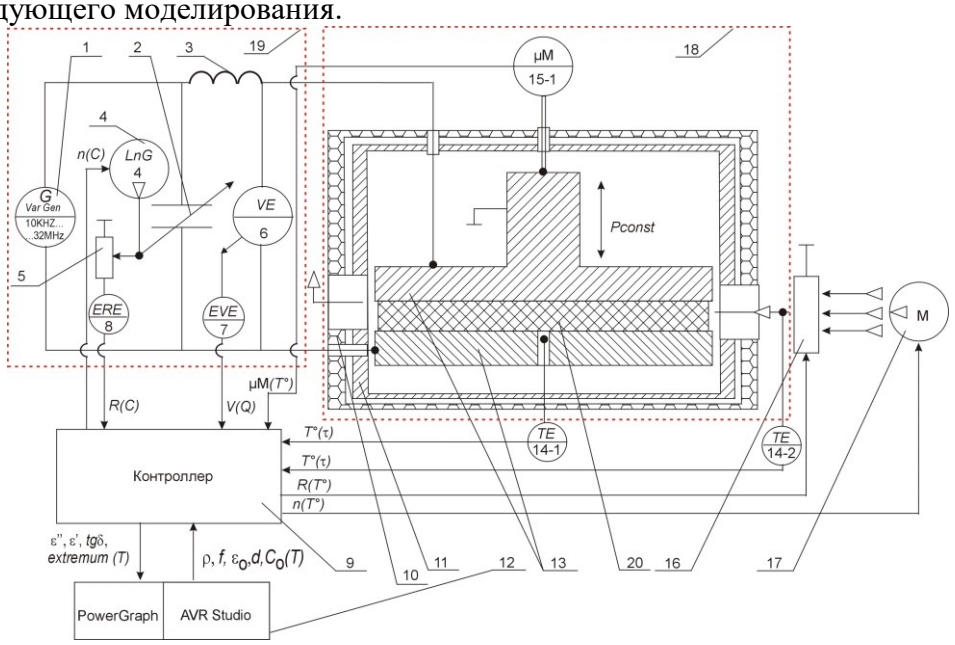
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, связанная с необходимостью повышения качества и надежности упаковочных пленочных материалов за счет совершенствования процессов высокочастотной сушки многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных систем. Сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены сведения об апробации результатов и публикациях автора, а также показано соответствие диссертации паспорту специальности 2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

В первой главе представлен литературно-патентный обзор, посвященный современным композиционным полимерным материалам для защитных и упаковочных пленок, состоянию дел в полимерной индустрии при их выпуске, а также факторам, влияющим на механические свойства пленочных изделий. Показано, что упаковка является крупнейшим сектором потребления полимеров, а повышенная влажность сырья является одной из основных причин снижения прочности и долговечности пленок. Рассмотрены существующие методы сушки полимерных материалов, обоснована перспектива использования высокочастотной диэлектрической сушки и проанализированы физические процессы ВЧ-нагрева, а также существующие системы управления и математические модели процессов ВЧ-электротермии. Выявлены недостатки известных решений применительно к многокомпонентным слабополярным и неполярным полимерам, что послужило основанием для постановки цели и задач диссертации.

Во второй главе исследован процесс высокочастотного нагрева слабополярных и неполярных полимеров и устройство его реализации как объект управления; уточняется классификация полимеров по степени полярности и показано, что типовые композиции для упа-

ковочных пленок базируются на полипропилене и бимодальном полиэтилене. Проведен анализ существующих методов определения электрофизических параметров и обоснован выбор модифицированного резонансного метода на базе измерителя добротности ВМ-560. Описаны модернизация измерительной ячейки ЭС-1Т, разработка модуля автоматизированной системы научных исследований электрофизических параметров (АСНИ ЭФП) (рисунок 1), а также автоматизированный термогравиметрический метод контроля влажности. Изложена организация автоматизированного эксперимента по получению зависимостей диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь слабополярных и неполярных полимерных материалов от температуры и влагосодержания, формирующих исходную базу данных для последующего моделирования.



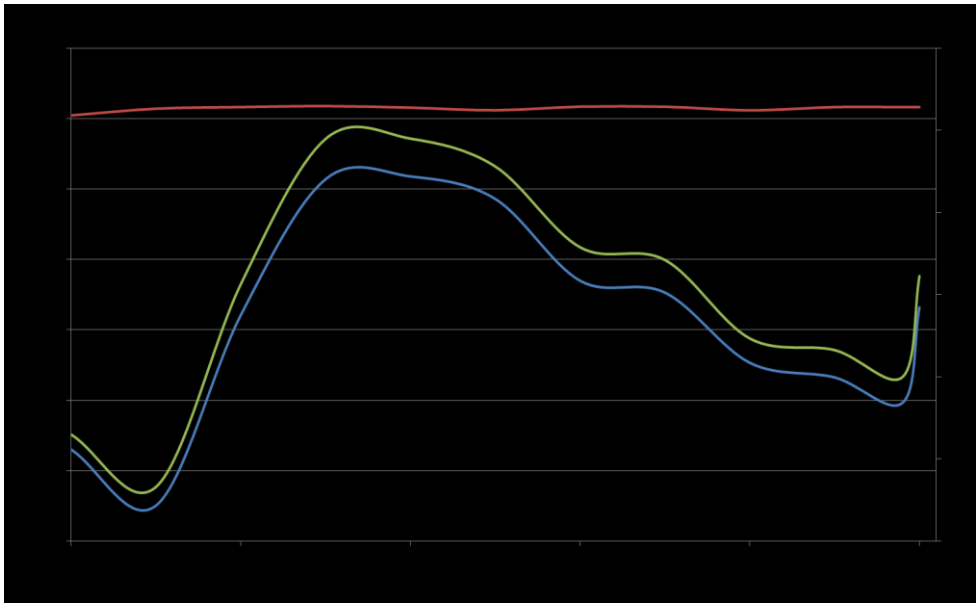
1 – генератор; 2 – настроечный конденсатор; 3 – катушка индуктивности; 4 – шаговый двигатель; 5 – переменный резистор; 6 – вольтметр; 7 – показания вольтметра;8 – показатель переменного резистора; 9 – контроллер; 10 – изолятор ячейки; 11 – корпус ячейки; 12 – персональный компьютер; 13 – электроды; 14 – 1, 14 – 2 – термопары; 15-1 – линейный датчик (микрометр); 16 – нагреватель фена; 17 – мотор фена; 18 – установка ВМ-560; 19 – экран ячейки; 20 – исследуемый полимерный материал

Рисунок 1 – Структурная схема модуля экспериментальной автоматизированной установки для измерения электрофизических показателей слабополярных и неполярных полимерных материалов

Изложена организация автоматизированного эксперимента по получению зависимостей диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь слабополярных и неполярных полимерных материалов от температуры и влагосодержания, формирующих исходную базу данных для последующего моделирования.

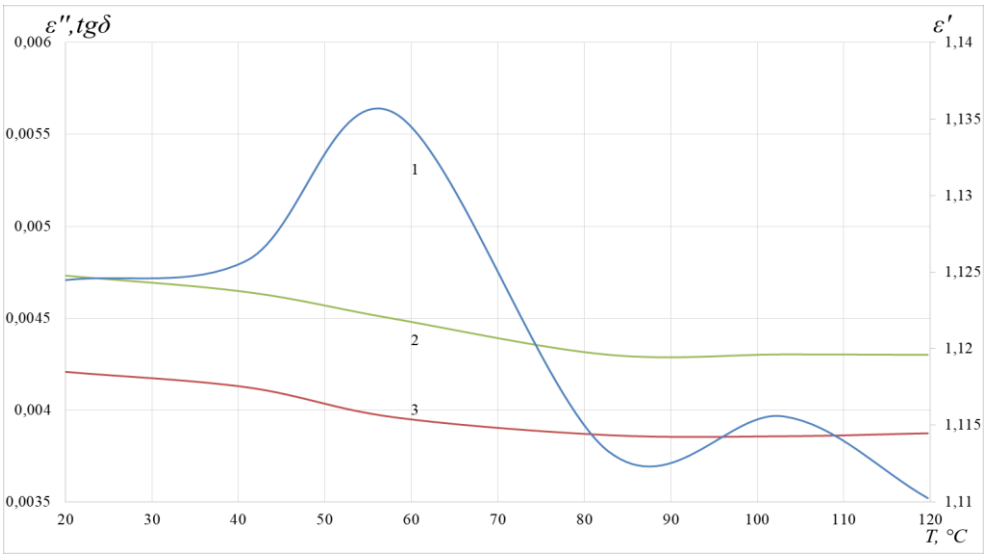
В данной установке использована модернизированная в рамках предлагаемого исследования измерительная ячейка ЭС-1Т. Модернизация проведена с целью обеспечения возможности нагрева исследуемого полимера непосредственно в конденсаторе измерительной ячейки.

Результаты температурных зависимостей $\varepsilon'(T)$ – диэлектрическая проницаемость, $\varepsilon''(T)$ – коэффициент диэлектрических потерь и $\mathrm{tg}\delta(T)$ – тангенс угла диэлектрических потерь полипропилена марки Н030 и бимодала марки FB 2310 представлены на рисунках 2 и 3 соответственно.



1 – ε' (диэлектрическая проницаемость); 2 – ε'' (коэффициент диэлектрических потерь); 3 – tgδ (тангенс угла диэлектрических потерь)

Рисунок 2 – Электрофизические показатели сухого полипропилена Н030 в зависимости от температуры



1 – ε' (диэлектрическая проницаемость); 2 – ε'' (коэффициент диэлектрических потерь); 3 – tgδ (тангенс угла диэлектрических потерь)

Рисунок 3 – Электрофизические показатели сухого бимодала FB 2310 в зависимости от температуры

Анализ данных показывает, что при повышении температуры полипропилена Н 030 до 90 °С *tgδ* увеличивается в 4 раза относительно его значения, полученного при температуре 20 °С. Свыше 90 °С наблюдается падение *tgδ*, но с практической точки зрения данный диапазон не представляет интереса, так как предполагаемая температура сушки не превышает 90 °С.

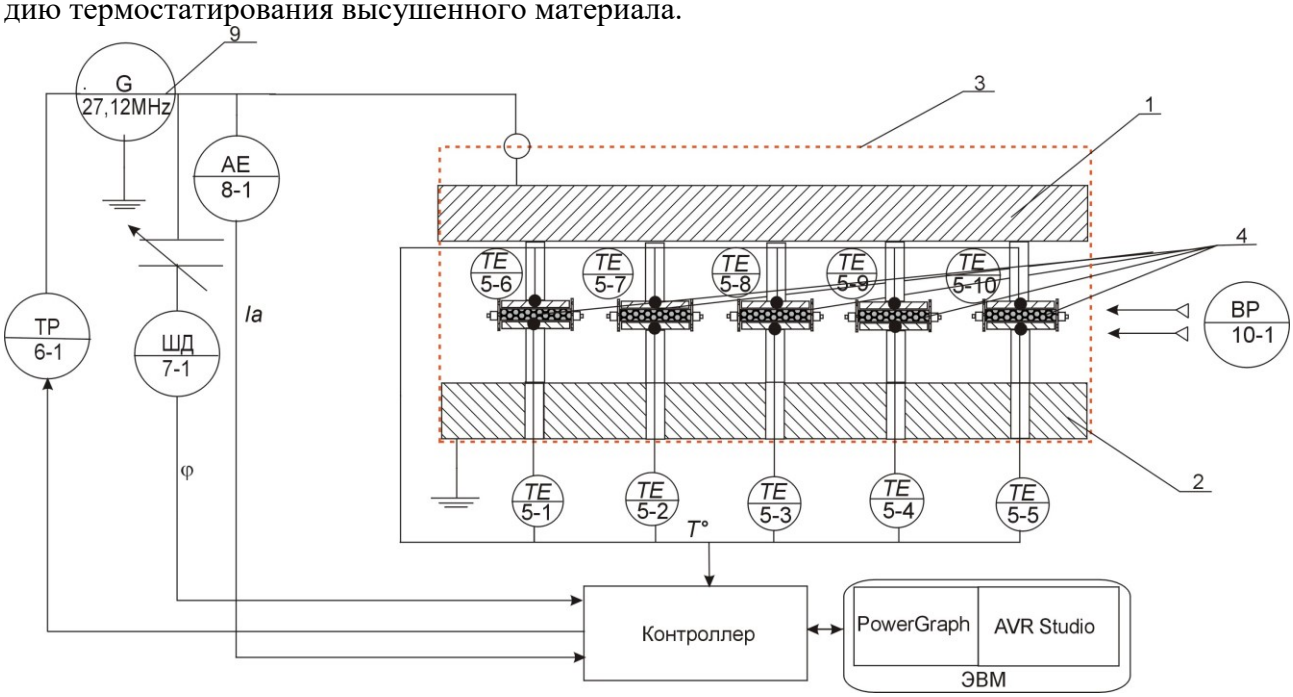
Здесь можно отметить, что электрофизические показатели сухого бимодала марки FB 2310 меняются незначительно. Следовательно, для него даже незначительное количество поглощенной влаги оказывает превалирующее влияние на ВЧ-разогрев.

Технологическая оснастка АСНИ с аппаратно-программным обеспечением процессов увлажнения, акклиматизации, сушки и управления со стабилизацией анодного тока. Электроды были выбраны диаметром по 56 мм, так как конденсаторов всего 5 штук, то общая площадь составляет 2461,76 мм^2, что в свою очередь равно максимальной обрабатываемой площади высокочастотного оборудования.

На графиках (рисунок 5 и 6) показана показатели работы оборудования ВЧ-сушки (частота излучения f = 27,12 МГц, напряжение U = 3460 B, площадь образца S = 2826 мм^2, толщина образца d = 7мм) бимодала марки FB 2310 кондиционированного в условиях влажности и кондиционированного внутри емкости при погружении в воду.

Анализ графика показывает, что система не перегревается, нагрев идет контролируемо, а к концу процесса устанавливается устойчивый температурный режим, характерный для завершенной сушки и последующего термостатирования высушенного полимера.

На графике видно, что система выходит на новый устойчивый уровень, при котором полимер преимущественно сухой, а процесс фактически переходит из стадии сушки в стадию термостатирования высушенного материала.

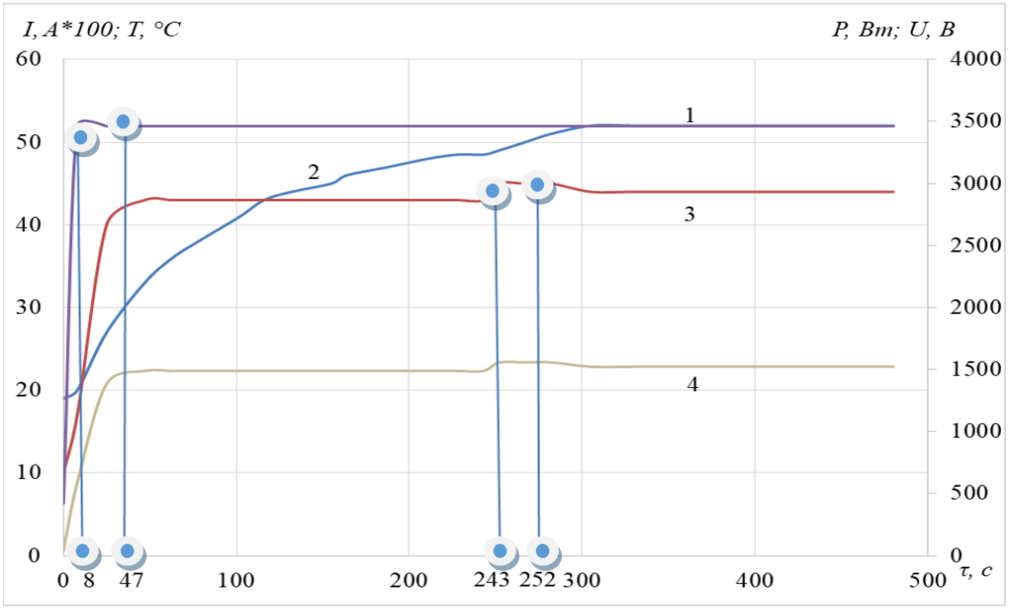


1, 2 – высокопотенциальный и низкопотенциальный электроды соответственно; 3 – защитный экран; 4 – полимеры; 5-1, 5-2, 5-3, 5-4, 5-5, 5-6, 5-7, 5-8, 5-9, 5-10 терморезисторы; 6-1 – твердотельное реле; 7-1 – шаговый двигатель; 8-1 – датчик тока; 9 – ВЧ генератор; 10-1 – вентилятор

Рисунок 4 – Схема модернизированной АСНИ ВЧ – сушки многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов

Был выбран и усовершенствован метод определения электрофизических данных, комплекс контролируемых и управляемых параметров для создания модуля АСНИ ЭФП и отлажен автоматизированный эксперимент по получению зависимостей ε' и $tg\delta$ от T и ρ.

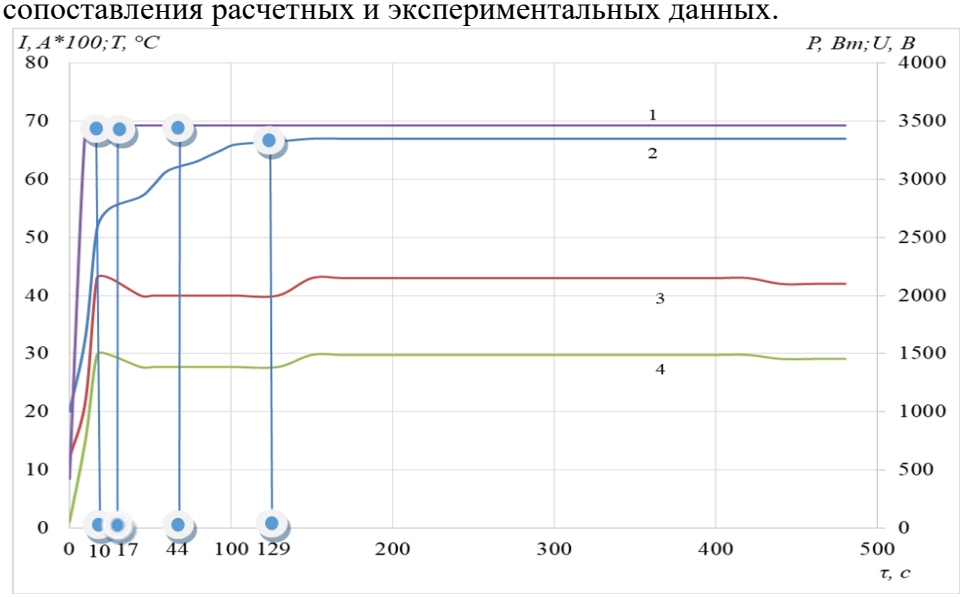
Создана база для построения адекватной модели и системы управления процессом сушки многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов.



1 – напряжение, U, В; 2 – температура, T °С;3 – ток, I_a;4 – мощность, P, Вт

Рисунок 5 – Показатели работы оборудования ВЧ-сушки полимерного материала марки бимодал FB 2310 кондиционированного в условиях влажности

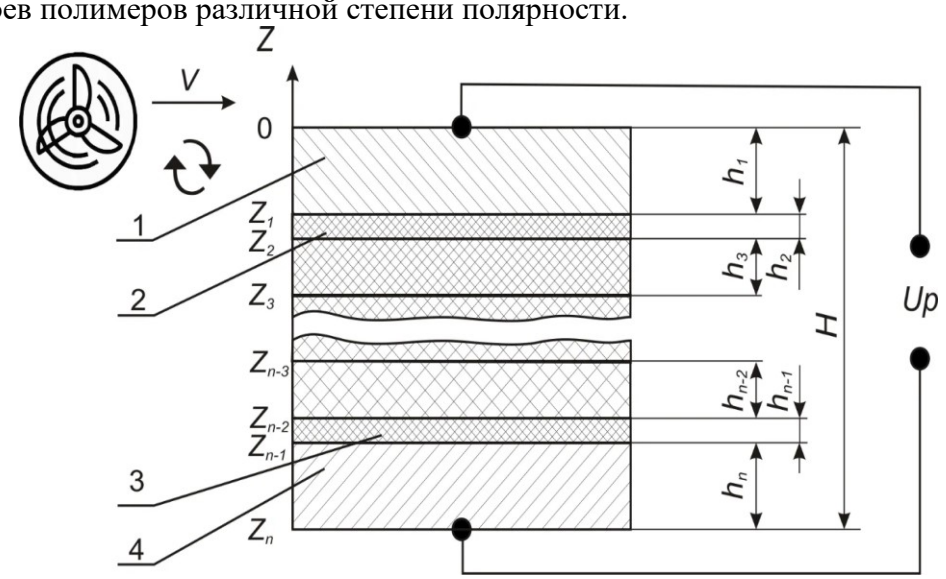
Третья глава посвящена разработке математической модели высокочастотного нагрева многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов, основанной на уравнениях нестационарной теплопроводности с внутренними источниками тепла и граничными условиями третьего и четвертого рода, учитывающей температурную и влажностную зависимость электрофизических и теплофизических параметров и тепловое взаимодействие слоев технологической системы с учетом насыпной плотности сырья, при наличии конвективной теплоотдачи в условиях активной вентиляции. На основе предложенной модели проведено моделирование процесса сушки двухкомпонентных составов, соответствующих реальным сырьевым композициям для упаковочных пленок, исследовано влияние параметров режима ВЧ-воздействия и соотношения компонентов на динамику прогрева и удаления влаги. Выполнен сравнительный анализ вариантов чередования слоев полимеров и элементов оснастки, выявлены конфигурации, обеспечивающие более равномерное температурное поле и снижение риска локального перегрева. Показана адекватность разработанной модели путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных.



1 – напряжение, U, В; 2 – температура, T °С; 3 – ток, I_a; 4 – мощность, P, Вт

Рисунок 6 – Показатели работы оборудования ВЧ – сушки полимерного материала марки бимодал FB 2310 кондиционированного внутри емкости при погружении в воду бимодала FB2310

В рамках настоящей работы разработана технологическая система процесса ВЧ-сушки многокомпонентных смесей, представленная ниже (рисунок 7). Данная технологическая система отличается от ранее используемых наличием системы активной вентиляции и чередующихся слоев полимеров различной степени полярности.



1, 4 – высокопотенциальный и низкопотенциальный электроды рабочего конденсатора с координатами границ слоев 0, Z_1, Z_{n-1}, Z_n, толщиной h_1, h_n, соответственно; 2, 3 – теплоизоляторы верхний и нижний с координатами границ слоев Z_1, Z_2, Z_{n-2}, Z_{n-1}, толщиной h_2, h_{n-1} соответственно и расположенными между ними многослойными полимерными материалами с координатами границ слоев Z_2, Z_3, Z_{n-3}, Z_{n-2}, толщиной $h_3 \ldots h_{n-2}$; U_p – напряжение на обкладках рабочего конденсатора; V – поток воздуха

Рисунок 7 – Технологическая система ВЧ-сушки многокомпонентных полимерных смесей

Система дифференциальных уравнений представлена ниже (1).

$$\begin{cases} \rho_1 C_{p1}(T_1)\dfrac{\partial T_1}{\partial \tau} = \dfrac{\partial}{\partial_z}\left(\lambda_1(T_1)\dfrac{\partial T_1}{\partial z}\right) & (1.1) \\ \rho_2 C_{p2}(T_2)\dfrac{\partial T_2}{\partial \tau} = \dfrac{\partial}{\partial_z}\left(\lambda_2(T_2)\dfrac{\partial T_2}{\partial z}\right) & (1.2) \\ \rho_3 C_{p3}(T_3)\dfrac{\partial T_3}{\partial \tau} = \dfrac{\partial}{\partial_z}\left(\lambda_3(T_3)\dfrac{\partial T_3}{\partial z}\right) + P_3(T_3) & (1.3) \\ \ldots & \\ \rho_{n-2} C_{pn-2}(T_{n-2})\dfrac{\partial T_{n-2}}{\partial \tau} = \dfrac{\partial}{\partial_z}\left(\lambda_{n-2}(T_{n-2})\dfrac{\partial T_{n-2}}{\partial z}\right) + P_{n-2}(T_{n-2}) & (1.4) \\ \rho_{n-1} C_{pn-1}(T_{n-1})\dfrac{\partial T_{n-1}}{\partial \tau} = \dfrac{\partial}{\partial_z}\left(\lambda_{n-1}(T_{n-1})\dfrac{\partial T_{n-1}}{\partial z}\right) & (1.5) \\ \rho_n C_{pn}(T_n)\dfrac{\partial T_n}{\partial \tau} = \dfrac{\partial}{\partial_z}\left(\lambda_n(T_n)\dfrac{\partial T_n}{\partial z}\right) & (1.6) \end{cases} \quad (1)$$

Начальные условия (2):

$$T|_{\tau=0} = T_н, 0 \le z \le Z_n, \quad (2)$$

где $T_н$, T – начальная и текущая температура материала в процессе обработки соответственно;

z – текущая координата рассматриваемого слоя технологической системы; ρ_i, λ_i (T), C_{pi} (T), P_i (T),

τ – плотность, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, удельная мощность внутреннего источника тепла, время соответственно. Здесь $j = 1 \ldots n$, где n – количество слоев технологической системы.

Первое и n-ое уравнения системы (1.1, 1.6) описывают, нагрев высокопотенциального и низкопотенциального электродов, соответственно.

Уравнения 1.2, 1.5 соответствуют нагреву электротеплоизоляционного материала.

Уравнения 1.3, 1.4 описывают, нагрев чередующихся полимерных материалов разной степени полярности с внутренними источниками тепла.

Необходимо отметить, что в данных уравнениях ρ_3, …, ρ_{n-2} представляют собой насыпные плотности материалов и позволяют совместно с ранее определенными электрофизическими параметрами учесть использование гранулированного полимерного сырья.

Граничные условия на внешних границах электродов соответствуют условиям третьего рода (3), (4):

$$-\lambda_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial z}|_{z=0} = \alpha_1(V,T_1)\cdot T_1, \quad (3)$$

$$-\lambda_n(T_n)\frac{\partial T_n}{\partial z}|_{z=z_n} = \alpha_n \cdot T_n, \quad (4)$$

где ΔT_1, ΔT_n – разницы температур поверхности высокопотенциального и низкопотенциального электродов, соответственно и окружающей среды;

α_1, α_n – коэффициенты теплоотдачи поверхности электродов;

V – скорость воздушного потока вентилятора обдува для удаления испарившейся влаги.

В отличие от работ, в которых $\alpha_1 \ldots \alpha_n$ обоснованно приняты равными нулю, в рассматриваемом случае сушки многокомпонентных обводненных полимеров вести подобное упрощение не представляется возможным и необходим расчет коэффициентов теплоотдачи. Принимая во внимание верхнее расположение вентилятора обдува $\alpha_1 = f(V, T_1)$ при $\alpha_n = 0$.

Тепловое взаимодействие между слоями описывается граничными условиями четвертого рода, при этом на границах слоев температуры и тепловые потоки равны (5):

$$\begin{cases} T_j = T_{j+1} \\ \lambda_j(T_j)\dfrac{\partial T_j}{\partial z} = \lambda_{j+1}(T_j)\dfrac{\partial T_{j+1}}{\partial z} \text{ при } z = z_j, (j = 1 \ldots n-1), \end{cases} \quad (5)$$

где Tj – температура на границе технологической системы j-го слоя.

Удельная мощность $Pi(T)$ отлична от нуля только для полимеров, находящихся в диапазоне координат $Z_2 \ldots Z_{n-2}$.

Следует отметить, что в правой части уравнений, описывающих тепловые процессы в полимерных материалах (1.3), (1.4) системы (1) указаны мгновенные удельные мощности $P_3(T_3 \ldots P_{n-2}(T_{n-2})$, определение которых возможно расчетно-экспериментальным путем. Методика их определения, используемая в настоящей работе, описана в работах научной школы высокочастотной электротермии ИрГУПС.

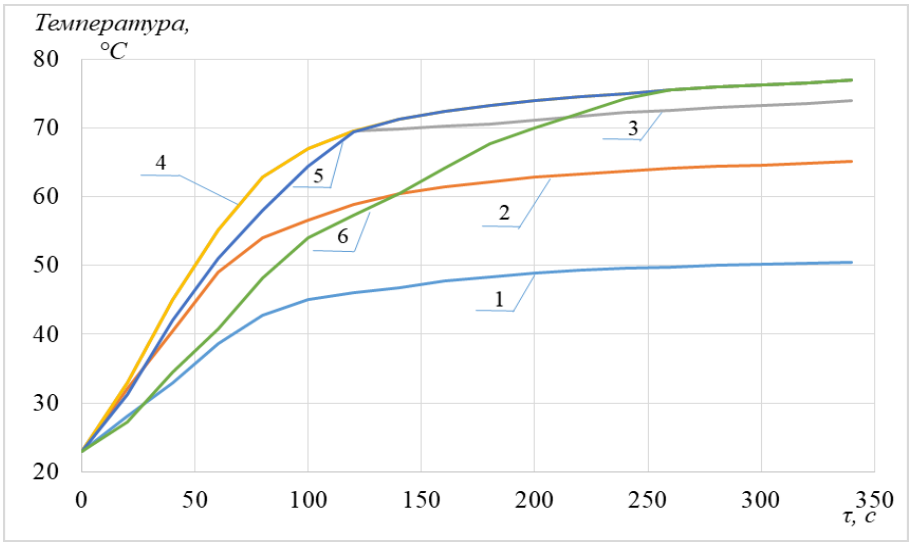
Описанную выше математическую модель, можно модифицировать для моделирования процесса сушки сколь угодно сложных многокомпонентных полимерных материалов.

На основе экспериментально снятых кривых охлаждения, с использованием ранее описанного программного обеспечения методом последовательного приближения были определены температурные зависимости коэффициентов теплоотдачи, применяемые при моделировании процессов сушки полимерных композиций.

Дальнейшее моделирование производилось при следующих вариантах чередования слоев полимерных материалов (таблица 1) для анализа динамики их разогрева и определения времени $t_{суш}$ достижения полимерами температуры сушки $T_{суш}$.

Таблица 1 – Варианты чередования слоев полимеров в технологической системе (p – полипропилен марки H030, b – бимодал марки FB 2310)

№ варианта чередования	Последовательность чередования слоев
1	pppppp
2	bbbbbb
3	ppbbbb
4	bbbbpp
5	bbppbb



1 – Бимодал FB 2310; 2 – Бимодал FB 2310; 3 – Бимодал FB 2310; 4 – Бимодал FB 2310; 5 – Полипропилен H 030; 6 – Полипропилен H 030

Рисунок 9 – Вариант чередования «bbbbpp», графики изменения температуры слоев во времени

Вариант (bbbbpp) (рисунок 9) показал наиболее равномерное и устойчивое распределение температуры. Уже через 100 секунд практически все слои прогреваются примерно до 60 °C, а к 300 секундам выходят на стабилизацию температуры, где среднее значение 69,9 °C. Разница между нижними слоями не превышает 4 °C. Здесь на верхних слоях более полярный полимер активнее выделяет тепло и тем самым восполняет потери тепла, вызванные воздушным обдувом. Иными словами, охлаждение сверху и активный нагрев бимодала действуют навстречу друг другу, создавая баланс и неполярные полимеры тем самым равномерно увеличивают температуру. Благодаря этому температура по толщине образца выравнивается, тепловое поле становится симметричным и стабильным. Такой тип структуры обеспечивает оптимальные условия для сушки.

Таким образом, построена и верифицирована модель ВЧ-нагрева увлажненных многокомпонентных слабополярных и неполярных полимеров, учитывающая тепловое взаимодействие слоев и нелинейность параметров. Результаты моделирования используются для обоснования конфигурации технологической системы и выбора режимов ВЧ-сушки.

Четвертая глава показывает результаты разработки и внедрения автоматизированной системы управления процессом высокочастотной сушки многокомпонентных полимерных материалов. Приведены экспериментальные зависимости электрических и физических параметров работы ВЧ-установки, использованные для настройки модели и выбора диапазонов управляющих воздействий. Предложены подходы к расчетному определению эквивалентных электрофизических параметров компонентов смеси и методика определения рациональных режимов ВЧ-сушки с учетом стадии предварительного нагрева. Разработаны функциональная схема АСУ ТП (рисунок 10), циклограмма (рисунок 11) и алгоритм функционирования системы (рисунок 13, 14) на базе контроллера с использованием комплекса информативных параметров, включая коэффициент динамики частичных разрядов для диагностики предпробойного состояния.

Описаны конструктивно-функциональная схема промышленной установки ВЧ-сушки, блок компараторов по ключевым параметрам и результаты опытно-промышленного внедрения на предприятии по выпуску упаковочных пленок, показавшие снижение доли брака более чем на 8% и повышение воспроизводимости эксплуатационных характеристик материалов.

Функциональная схема АСУ ТП высокочастотной электротермии для сушки многокомпонентных слабополярных и неполярных материалов с двумя контурами обратной связи представлена на рисунке 10, где ЗУ – задающее устройство, определяющее нулевое положе-

ние угла поворота подстроечного конденсатора в начале обработки каждой порции высушиваемого материала; ОУ – объект управления, в качестве которого выступает устройство высокочастотного нагрева (УВН); ИУ1 – исполнительное устройство (шаговый двигатель поворота настроечного конденсатора для изменения напряжения рабочего конденсатора $U_р$); ИУ2 – вентилятор системы принудительной конвекции, работает в релейном режиме в состоянии ВКЛ/ВЫКЛ при V = const; ЧЭ$_1$ – чувствительный элемент в виде датчика тока (ДТ) предназначенного для организации первой из двух главных обратных связей; ЧЭ$_{21}$ и ЧЭ$_{22}$ – чувствительные элементы (датчики температуры) определяющие вторую главную обратную связь; ЧЭ$_3$ – чувствительный элемент в виде датчика напряжения для организации вспомогательной обратной связи выхода в рабочий режим и контроля стабильности электрофизических параметров работы ВЧ-оборудования; ЧЭ$_4$ – чувствительный элемент фиксации частичных разрядов для организации вспомогательной обратной связи контроля предпробойного состояния; УУ$_1$…УУ$_5$ устройства управления соответствующих обратных связей.

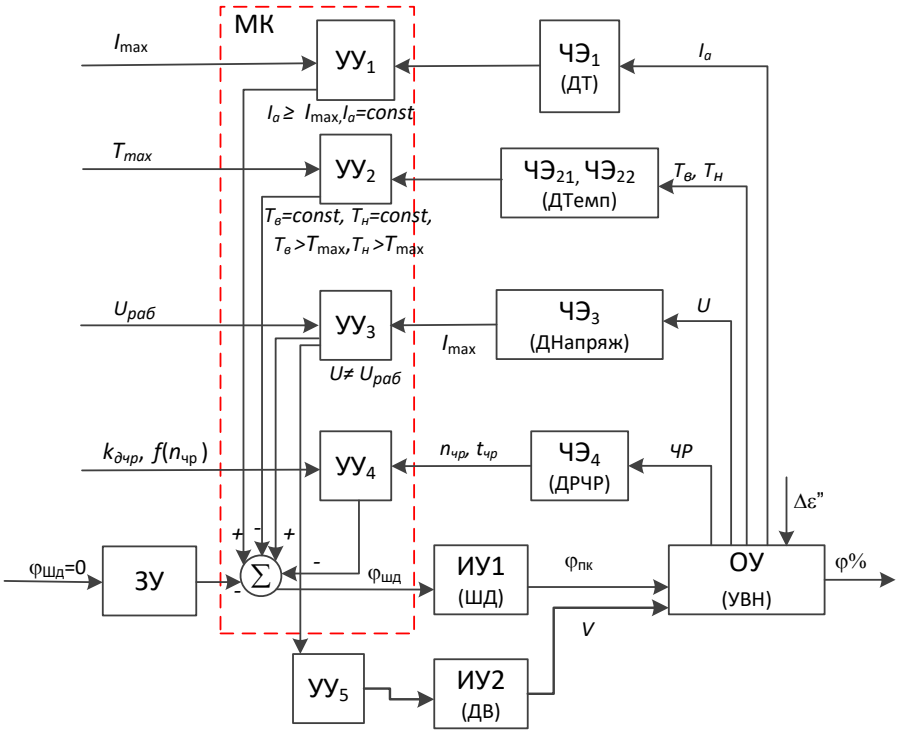


Рисунок 10 – Функциональная схема АСУ ТП

Разработанная циклограмма (рисунок 11) отражает во времени и по стадиям весь технологический цикл работы оборудования и средств автоматизации технологического процесса высокочастотной сушки, определяет работу объекта и исполнительных механизмов по времени и событиям. На основе разработанной циклограммы была сформирована функциональная схема и алгоритм функционирования АСУ ТП, описывающий логическую последовательность обработки сигналов и формирования управляющих воздействий контроллерами контроллер 1 и контроллер 2 (рисунок 12). Циклограмма и алгоритм функционирования АСУ ТП высокочастотной сушки многокомпонентных полимерных материалов представлены на рисунках: 11; 13; 14.

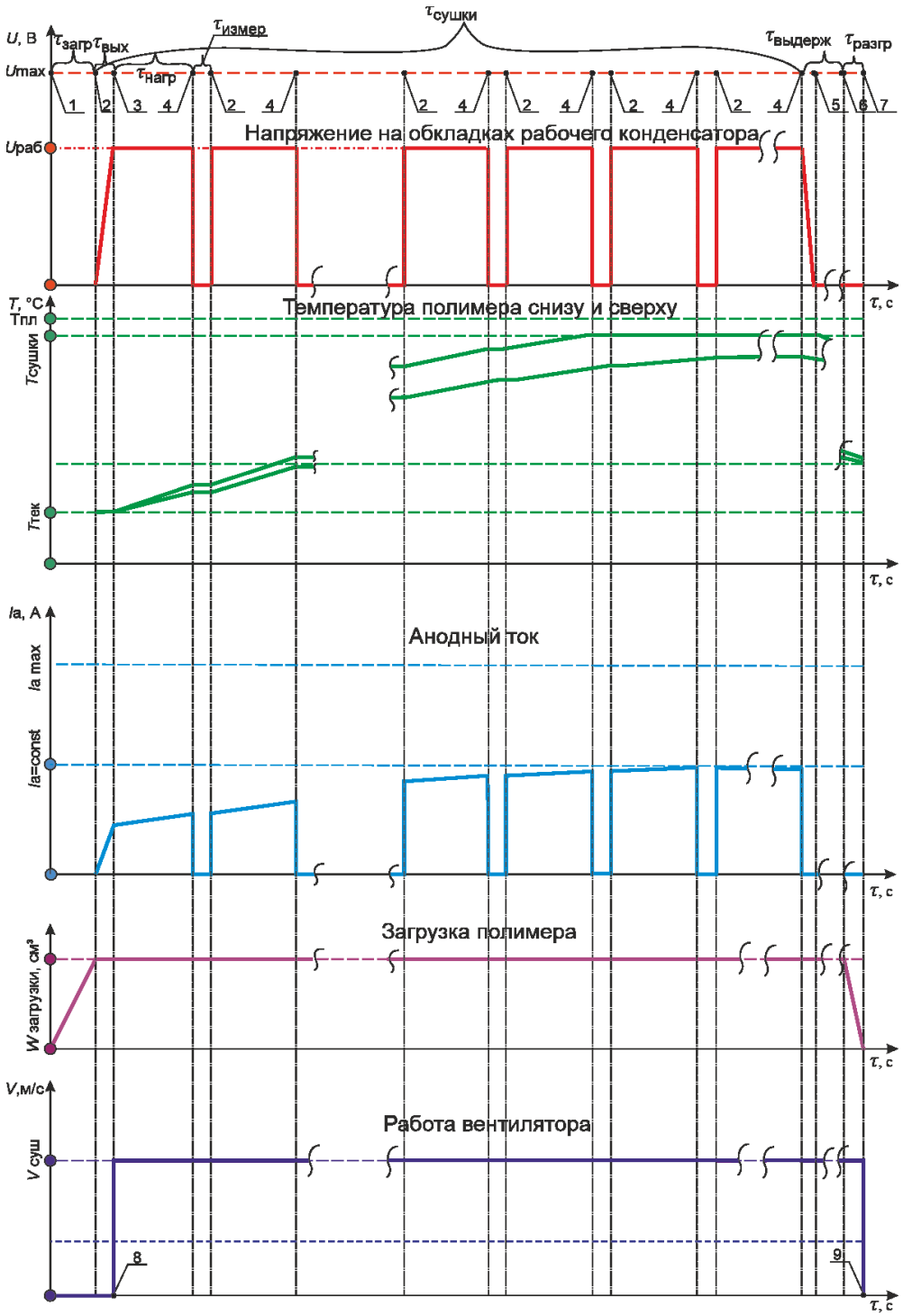


Рисунок 11 – Циклограмма процесса высокочастотной сушки многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов

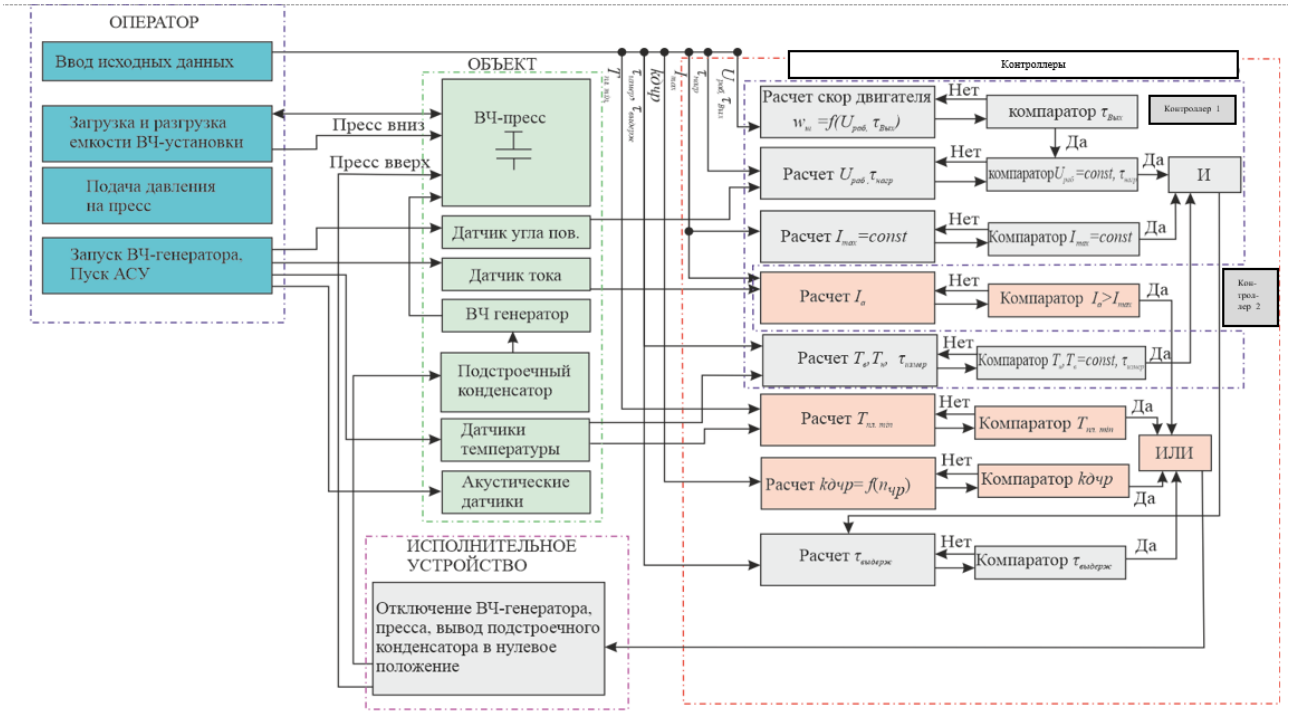


Рисунок 12 – Функциональная схема системы автоматизированного управления процессом сушки слабополярных и неполярных многокомпонентных полимерных материалов

Аналогичная структура построения блока АСУ ТП успешно использовалась сотрудниками нашей научной школы, показала хорошие результаты по надежности и работоспособности, поэтому и была взята в качестве базовой. Тем не менее, разработанная в рамках настоящей работы система имеет ряд отличительных особенностей. Так, блочное ее построение («Блок установки рабочего напряжения», «Защитные блоки», «Блоки контроля», «Блок отключения») позволяет обеспечить мало затратную ремонтопригодность. Разделение по функционалу программируемые контроллеры (контроллер 1 и контроллер 2) и их подбор по вычислительной мощности позволили повысить скорость, отказо-устойчивость системы и снизить себестоимость блока автоматизации.

Алгоритм функционирования АСУ ТП процесса ВЧ-сушки (рисунки: 13, 14) содержит:

1. Последовательные блоки работы в соответствии с назначением главных обратных связей по току и температуре («Блок установки рабочего напряжения ВЧ-генератора», «Блок контроля анодного тока генератора», «Блок контроля температуры полимерных материалов»).

2. Параллельные процессы в соответствии с назначением вспомогательных обратных связей:

– «Защитный блок обнаружения пробойных явлений» по контролю частоты возникновения частичных разрядов в соответствии с методикой;

– «Защитный блок контроля допустимой токовой нагрузки»;

– «Блок включения и выключения работы ВЧ-оборудования» предназначенный для организации процесса ВЧ-нагрева и измерения температуры нагрева полимеров.

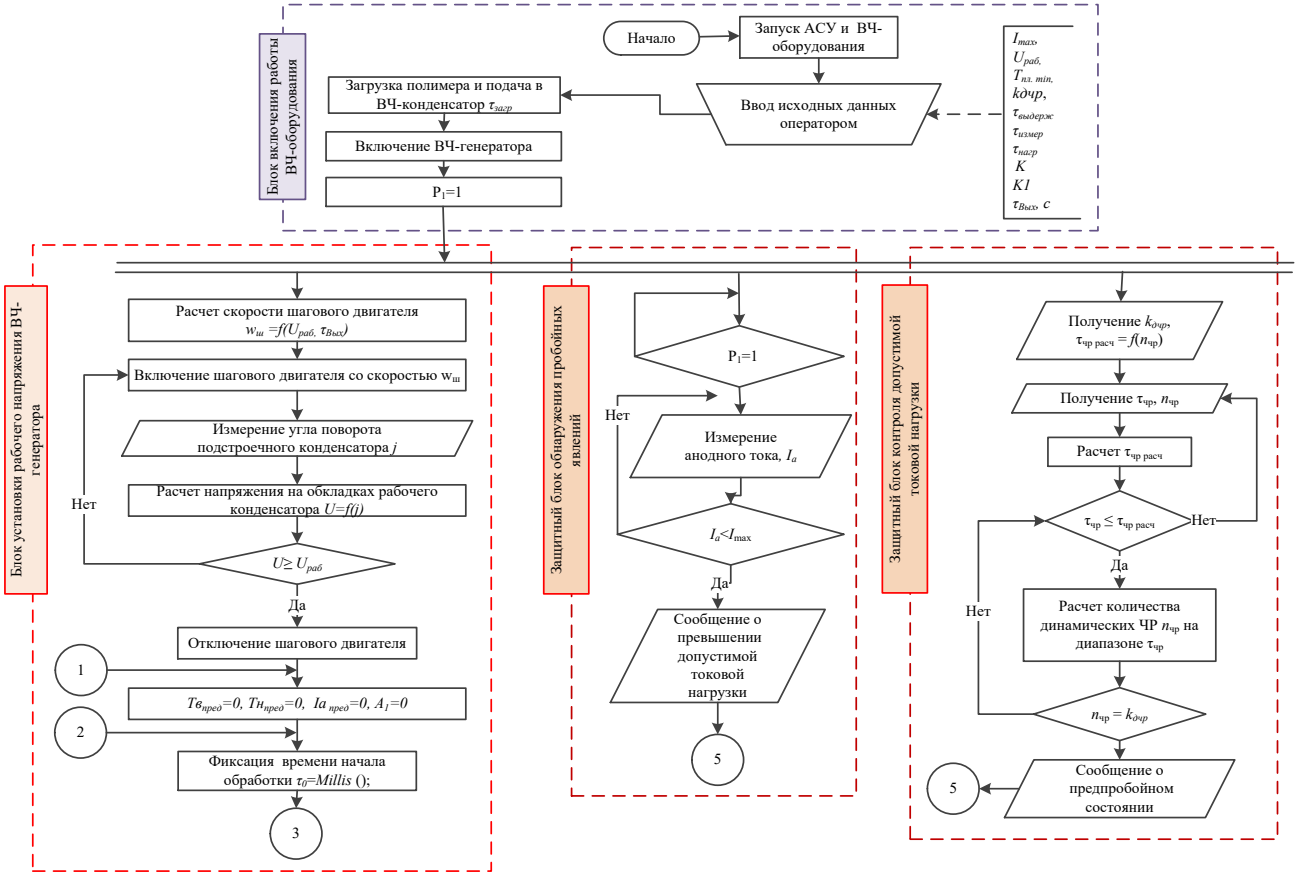


Рисунок 13 – Алгоритм АСУ ТП ВЧ-сушки

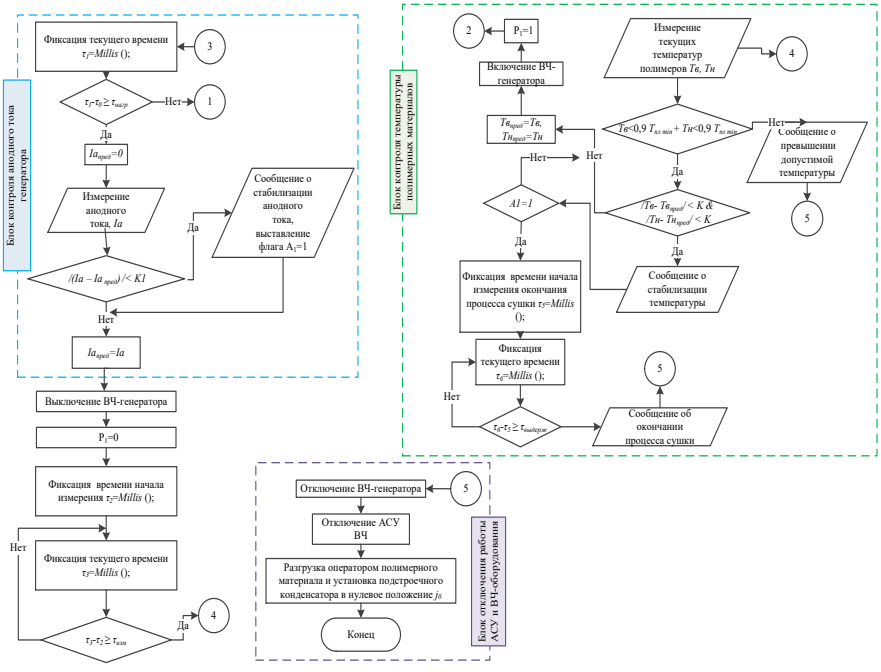


Рисунок 14 – Алгоритм АСУ ТП ВЧ-сушки

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основе проведенных в диссертации теоретических и экспериментальных исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения в области автоматизации процессов управления высокочастотной сушкой многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов, внедрение которых обеспечивает повышение энергоэффективности обработки сырья и эксплуатационных свойств упаковочных пленок.

В том числе:

1. Проведен анализ современного состояния полимерной индустрии, методов производства защитных и упаковочных пленочных материалов, а также существующих систем управления процессом ВЧ-обработки полимеров.

2. На основе исследования процесса высокочастотной совместной обработки слабополярных и неполярных термопластичных материалов и устройства его реализации как объекта управления (ОУ) произведен и обоснован выбор автоматизированных методов исследования (резонансный, термогравиметрии).

3. Разработан автоматизированный модуль определения и оценки электрофизических параметров слабополярных и неполярных полимеров для регистрации электрофизических параметров $\varepsilon'(T,\rho)$ и $\mathrm{tg}\delta(T,\rho)$ в составе автоматизированной системы научных исследований высокочастотной обработки (АСНИ ВЧ).

4. По результатам исследования процесса предложен и реализован комплекс контролируемых параметров процесса ВЧ-обработки слабополярных и неполярных полимерных материалов, включающий в себя: анодный ток ВЧ-генератора $I_{\text{а}}$, температуры нижней и верхней поверхностей обрабатываемого полимерного массива $T_{\text{н}}$, $T_{\text{в}}$ после выхода на максимальное энергетическое воздействие, напряжение рабочего конденсатора $U_{\text{раб}}$ высокочастотного оборудования, количество частичных разрядов $n_{\text{чр}}$.

5. Разработана математическая модель нагрева увлажненных многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов в ВЧ-поле, отличающаяся учетом конвективной теплоотдачи от активной вентиляции, позволяющая проводить анализ распределения температурных полей различных многокомпонентных полимерных смесей и выявлять рациональное чередование слоев полимеров при их ВЧ-нагреве.

6. Сформирована укрупненная последовательность этапов организации ВЧ-сушки: от предварительного диэлектрического анализа поступающей партии сырья до расчета электрофизических параметров (ε', $\mathrm{tg}\delta$, добротность Q) и выбора безопасных режимов обработки с учетом текущего состояния материала (влажность, загрязнения) Установлены закономерности влияния состава, структуры и чередования слоев и режимов ВЧ-воздействия на температурные поля и кинетику сушки, обоснованы критерии выбора рациональных режимов и конфигураций.

7. Разработано структурное, алгоритмическое и программное обеспечение АСУ ТП процесса ВЧ-сушки многокомпонентных полимерных материалов с использованием комплекса информативных контролируемых и управляемых параметров и модуля определения электрофизических параметров полимеров на основе анализа экспериментальных данных работы промышленного оборудования.

8. Предложенные научно-обоснованные решения реализованы на промышленной ВЧ-установке, что позволило повысить энергоэффективность обработки сырья и эксплуатационные свойства пленочных изделий, выраженные в снижении общих производственных затрат на 970 347 руб. в год, что включает в том числе экономию электроэнергии, снижение брака, снижение простоев и исключение повторных циклов сушки.

В качестве возможностей развития темы исследования выделим следующие направления:

1. Масштабирование обработки на многокомпонентные смеси сложного состава.
2. Автоматизация процесса загрузки/выгрузки оборудования ВЧ-обработки для построения поточных линий.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Фарзалиев, Э. Ф.** Автоматизированное исследование электрофизических свойств полимерных и композиционных материалов / **Э. Ф. Фарзалиев**, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц // Электротехнологии и электрооборудование в АПК – Москва: Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, 2023. – Вып. 2 (51) – С. 93-99.

2. **Фарзалиев, Э. Ф.** Автоматизированные исследования диэлектрических параметров полимерных материалов в составе технологической смеси / **Э. Ф. Фарзалиев**, Н. Г. Филиппенко, Буторин, Д. В. А. А. Серболина // Электротехнологии и электрооборудование в АПК – Москва: Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, 2024. – Вып. 3 (56) – С. 100-110.

3. **Фарзалиев, Э. Ф.** Расчет коэффициента теплоотдачи полимерного композита / **Э. Ф. Фарзалиев** // Вестник Пермского Национального Исследовательского Политехнического Университета. Химическая технология и биотехнология – 2024. – № 3 – С. 154-165.

4. **Фарзалиев, Э. Ф**. Автоматизированный метод термогравиметрии для обеспечения контроля влажности и регулирования температуры в рабочей камере/ **Э. Ф. Фарзалиев** // Вестник Пермского Национального Исследовательского Политехнического Университета. Химическая технология и биотехнология – 2025. – № 1 – С. 100 – 108.

В изданиях, индексируемых в международных патентно-аналитических базах данных WoS и Scopus:

5. **Farzaliev E.,** Algorithm of the Automated Scientific Research System for Studying the Drying Process of Multicomponent Polymers / **Farzaliev E**., T. Chumbadze, N. Filippenko, V. Bychkovsky // Journal of Physics: conference series, Krasnoyarsk, Russia. – 2021 – Vol. 2647. – P. 60018.

Патент и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

6. Автоматизированная система исследования полимерных и композиционных материалов. Патент на изобретение № 2731272 / **Фарзалиев Э. Ф.**, Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В., Буторин Д. В., Каргапольцев С. К., Бычковский В. С., Грамаков Д. С., Баканин Д. В., Курайтис А. С. // Патентообладатель: ФГБОУ ВО ИрГУПС. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 25.12.2019.

7. Программный фильтр параметрических сигналов работы высокочастотного оборудования. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019665063 / **Фарзалиев Э. Ф**., Баканин Д. В., Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В., Грамаков Д. С., Егоров А. И. // Правообладатель: ФГБОУ ВО ИрГУПС. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11.11.2019.

8. Программный модуль обеспечения автоматизированного процесса научного исследования электротермической высокочастотной сушки многокомпонентных полимерных материалов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668393/ **Фарзалиев Э. Ф**., Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В., Баканин Д. В. // Правообладатель: ФГБОУ ВПО ИрГУПС. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 08.11.2021.

9. Программа расчета электрофизических параметров «Aleo-HTR V2.6». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026666216 / **Фарзалиев Э. Ф**., Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В. // Правообладатель: ФГБОУ ВПО ИрГУПС. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 29.05.2026.

В других изданиях:

10. **Фарзалиев Э. Ф**. Упаковка из полимера для транспортировки пиломатериалов // **Фарзалиев Э. Ф**., Рыбкин И.А., Карпов А.В. Электронный научный журнал "Молодая наука Сибири" Номер журнала (Том): 1(3) 2019.

11. **Фарзалиев Э. Ф**. Автоматизированные исследование влияния влажности на физико-механические свойства многокомпонентных полимерных материалов, используемых на транспорте// **Фарзалиев Э. Ф**., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Грамаков Д.С./ Электронный научный журнал "Молодая наука Сибири" Номер журнала (Том): 2(8) 2020.

12. **Фарзалиев Э. Ф**. Технология и автоматизация процессов ВЧ-сушки многокомпонентных полимерных и композиционных материалов // **Фарзалиев Э. Ф.**, Ларченко А.Г., Грамаков Д.С., Баканин Д.В. / Электронный научный журнал "Молодая наука Сибири" Номер журнала (Том): 3(5) 2019.

13. **Фарзалиев Э. Ф**. Технология повышения качества изделий машиностроения. автоматизированный метод высокочастотного контроля // **Фарзалиев Э. Ф.**, Ларченко А.Г., Грамаков Д.С, Баканин Д.В. / Электронный научный журнал "Молодая наука Сибири" Номер журнала (Том): 3(5) 2019.

14. **Фарзалиев Э. Ф**. Автоматизированная система регулирования температуры с учетом прогнозируемых изменений метеоусловий // **Фарзалиев Э. Ф**. Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Бычковский В.С. / Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Том 68. № 1(42).

15. **Фарзалиев Э. Ф**. Исследование гигроскопичности многокомпонентных полимерных материалов // **Фарзалиев Э. Ф**. Филиппенко Н.Г., Чумбадзе Т.Т. // Электронный научный журнал "Молодая наука Сибири" Номер журнала (Том): 1(11) 2021.

16. **Фарзалиев Э. Ф**. Аспекты использования автоматизированных систем управления процессом изготовления изделий из фотополимеров // **Фарзалиев Э. Ф.**, Чипизубов Н.А., Чумбадзе Т.Т. / Электронный научный журнал "Молодая наука Сибири" Номер журнала (Том): 1(11) 2021.

17. **Фарзалиев Э. Ф**. Алгоритм системы автоматизированных научных исследований процесса сушки многокомпонентных полимеров // **Фарзалиев Э. Ф.**, Филиппенко Н.Г., Бычковский В.С., Чумбадзе Т.Т., Грамаков Д.С. / Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Том 68. № 4(45).