

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

На правах рукописи



Фарзалиев Эмиль Физули-Оглы

**АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ВЫСОКОЧА-
СТОТНОЙ ОБРАБОТКИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СЛАБОПОЛЯР-
НЫХ И НЕПОЛЯРНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процес-
сами и производствами

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент, Н.Г. Филиппенко

Иркутск – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Анализ состояния дел в полимерной индустрии при выпуске защитных и упаковочных пленок	16
1.1 Полимерные защитные упаковочные пленки и проблемы их промышленного производства.....	16
1.2 Факторы, влияющие на механические свойства полимерных изделий из пленочных материалов	27
1.3 Энергоэффективные методы совместной термической обработки смеси слабополярных и неполярных полимерных материалов	30
1.4 Физические процессы высокочастотного нагрева и системы управления при ВЧ-обработке слабополярных и неполярных полимерных материалов, используемых при производстве защитных и упаковочных пленок АСУ ТП ВЧ-сушки.....	35
1.5 Анализ существующих математических моделей процессов высокочастотной обработки полимерных материалов и их использование при построении АСУ ТП	46
1.6 Постановка цели и задач диссертационного исследования.....	52
2 Автоматизация исследований электрофизических параметров слабополярных и неполярных полимерных материалов.....	54
2.1 Особенности процесса высокочастотного нагрева слабополярных и неполярных полимеров и устройства его реализации как объекта управления.	55
2.2 Методы определения электрофизических параметров полимеров.....	58
2.3 Разработка аппаратно-программного модуля автоматизированной системы научных исследований	60
2.4 Автоматизированный эксперимент по определению электрофизических показателей слабополярных и неполярных полимерных материалов	80
2.4.1 Методика автоматизированного определения электрофизических параметров	80
2.4.2 Исследование влияния влагосодержания и температуры на электрофизические параметры полимеров.....	84
2.4.3 Экспериментальное исследование динамики процесса ВЧ-сушки с использованием АСНИ-ВЧ	90
2.4.4 Формирование комплекса контролируемых параметров процесса ВЧ-сушки.....	97
Выводы по главе.....	103
3 Математическое моделирование процесса нагрева увлажненных многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов	105
3.1 Математическая модель нагрева многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов с учетом коэффициента теплоотдачи... ..	105
3.2 Моделирование процесса сушки двухкомпонентного состава слабополярных и неполярных полимерных материалов	110

3.3 Оценка влияния различных чередований слоев на динамику ВЧ-нагрева технологической системы	116
3.4 Оценка валидности математической модели	126
Выводы по главе.....	130
4 Автоматизация управления процессами ВЧ-обработки слабополярных и неполярных полимерных материалов	132
4.1 Последовательность этапов организации технологического процесса ВЧ-сушки.....	132
4.2 Снятие зависимостей электрических параметров ВЧ-установки	133
4.3 Расчетное определение электрофизических параметров каждого полимера, входящего в состав смеси.....	138
4.4 Определение режимов технологического процесса ВЧ-сушки полимерных материалов на основе предварительного нагрева.....	145
4.4.1 Реализация технологического процесса ВЧ-сушки полимерных материалов с использованием АСУ ТП.....	146
4.4.2 Функциональная схема АСУ ТП	148
4.4.3 Циклограмма процесса высокочастотной сушки многокомпонентных полимерных материалов.....	149
4.4.4 Алгоритм функционирования АСУ ТП процесса ВЧ-сушки.....	153
4.5 Проектирование блока автоматизированной системы управления процессом высокочастотной сушки многокомпонентных полимерных материалов	157
4.6 Функциональная схема АСУ ТП высокочастотной сушки полимерных материалов	160
4.6.1 Конструктивно-функциональная схема оборудования.....	165
4.7 Достижение цели диссертационной работы, обоснование эффективности разработанной АСУ ТП ВЧ-сушки многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов и ее внедрение	168
Выводы по главе.....	172
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ	174
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	176
Приложение А	188
Приложение Б.....	217
Приложение В.....	218
Приложение Г	219
Приложение Д.....	220
Приложение Е.....	221

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АСНИ ЭФП – автоматизированная система научных исследований электрофизических параметров;

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

ВЧ – высокая частота;

ВЧ-нагрев – высокочастотный нагрев;

ВЧ-сушка – высокочастотная сушка;

$k_{чр}$ – коэффициент динамики частичных разрядов;

П/П – подпрограмма.

ВВЕДЕНИЕ

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 полиолефинов 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., Донской С.Н., Калганова С.Г., Коновалов Н.П., Княжевская Г.С., Марков А.В., Юленец Ю.П., Румынский А.В., Федорова И.Г., Трофимов Н.В., Лившиц А.В., Буторин Д.В., Крыжановский В. К., Киселева Т. Ф., Павлов Н. Н., Тагер А. А. и других исследователей. Их работы посвящены описанию физических механизмов диэлектрического нагрева, построению математических моделей ВЧ-процессов и созданию АСУ ТП для сушки и термообработки полярных и однородных диэлектриков. 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.

Однако большинство известных моделей и систем управления ориентированы на материалы с выраженной полярностью и предполагают постоянство удельной мощности внутренних источников тепла, а также инвариантность электрофизических и теплофизических параметров во времени и по объему. Для многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных систем, используемых при производстве упаковочных пленок, практически отсутству-

ют экспериментальные данные о зависимостях диэлектрической проницаемости и потерь от температуры и влажности в условиях ВЧ-обработки, что не позволяет корректно настраивать режимы сушки и строить высокоточные модели. Имеющиеся АСУ ТП ВЧ-сушки, как правило, используют ограниченный набор контролируемых параметров и не обеспечивают адаптивного управления с учетом реального состояния материала.

Таким образом, существует противоречие между потребностью отрасли в надежной и энергоэффективной технологии ВЧ-сушки многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов упаковочного назначения и недостаточной разработанностью метрологической, модельной и управляющей базы для решения данной задачи.

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.

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.

Научная новизна диссертационной работы включает следующие пункты:

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 соответствие условий транспортировки и хранения полимерного сырья требуемым 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.

Теоретическая значимость: полученные зависимости ε' , ε'' , $\operatorname{tg}\delta$ 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 матери-

алов, позволяющий решать задачи идентификации параметров увлажнения полимеров; математическая модель высокочастотного нагрева увлажненных многокомпонентных полимерных материалов с учетом конвекции как составляющей части технологического процесса; сформированный критерий выбора схемы чередования полимеров по слоям для организации автоматизированного процесса ВЧ-сушки полимерных смесей.

Практическая значимость 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).

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 $\operatorname{tg}\delta$ 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_a , температур нижней и верхней поверхностей полимерного массива T_n и T_v , напряжения рабочего конденсатора $U_{\text{раб}}$ и взаимосвязей между ними, обеспечивает повышение качественных свойств сырья при производстве пленочных изделий.

Соответствие диссертации паспорту специальности 2.3.3. Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» (технические науки) по следующим направлениям исследований:

1. п.3 – «Методология, научные основы, средства и технологии построения автоматизированных систем управления технологическими процессами

(АСУ ТП)...» – разработаны структура, алгоритмы и программно-техническое обеспечение АСУ ТП процесса ВЧ-сушки многокомпонентных полимерных материалов.

2. п.4 – «Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами» – предложена математическая модель нагрева многослойной технологической системы процесса высокочастотной сушки полимерных материалов и использована для расчета режимов сушки.

3. п.8 – «Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления и их цифровых двойников» – предложены новые методы идентификации процесса ВЧ-сушки и состояния увлажненности полимеров.

4. п.18 – «Разработка автоматизированных систем научных исследований» – разработан модуль АСНИ ЭФП, определяющий зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь полимерных материалов от температуры и влагосодержания.

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научно-практических конференциях по автоматизации производственных процессов, транспортному машиностроению и транспортной инфраструктуре в 2020 – 2023 гг.

Основные положения и результаты настоящего диссертационного исследования 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 со-

ставляет 222 страницы машинописного текста, содержащих 73 рисунка и 9 таблиц; список литературы включает 107 наименований.

Краткое содержание работы по главам:

- 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 упаковочных 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), 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;

- **в третьей главе** разработана одномерная математическая модель высокочастотного нагрева многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов, основанная на уравнениях нестационарной теплопроводности с внутренними источниками тепла и граничными условиями третьего и четвертого рода, учитывающая температурную и влажностную зависимость электрофизических и теплофизических параметров и тепловое взаимодействие слоев технологической системы. 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;

- **в четвертой главе** изложены 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, циклограмма и алгоритм функционирования системы 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;

- **в заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы, приведены обобщающие выводы, указаны направления дальнейших исследований в области совершенствования математических моделей, методов контроля и систем управления процессами высокочастотной обработки полимерных материалов.

Работа выполнена на кафедре Автоматизация производственных процессов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС) 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.

1 Анализ состояния дел в полимерной индустрии при выпуске защитных и упаковочных пленок

Полимерные пленочные материалы занимают доминирующее положение на рынке упаковки благодаря сочетанию прочности, малой массы, технологичности переработки и развитых барьерных свойств. Наиболее широкое распространение получили пленки на основе полиэтилена и полипропилена [87], в том числе в виде многослойных высоко и среднебарьерных структур, обеспечивающих защиту продукции на всех этапах логистического цикла. Вместе с тем интенсификация производства, ужесточение требований к качеству и условиям транспортировки выявляют ряд специфических проблем, связанных с обеспечением стабильных эксплуатационных характеристик таких материалов, включая чувствительность к остаточной влаге и режимам термической обработки сырья.

В этой связи представляется целесообразным более подробно рассмотреть состав, структуру и функции полимерных защитных упаковочных пленок, а также характерные проблемы, возникающие при их промышленном выпуске.

1.1 Полимерные защитные упаковочные пленки и проблемы их промышленного производства

Композиционные полимерные материалы для защитных и упаковочных пленок представляют собой многослойные многофункциональные системы, где базовые термопласты (полипропилен, бимодальный полиэтилен высокой плотности, ПНД (полиэтилен низкой плотности)) комбинируются с барьерными, связующими и функциональными слоями (красители, УФ-добавки и др.) для обеспечения комплексных эксплуатационных характеристик.

Многослойные системы строятся так, что каждый слой выполняет специализированную функцию: несущую (прочностную), барьерную (кислород, водяной пар, ароматы), адгезионно-функциональную (термохромный, печатный, защитный).

Примером может служить разработка полимерных пленочных материалов на основе полиолефинов для упаковки продукции, где оптимизация химической природы и ориентации пленки, а также геометрии перфорации позволила обеспечить требуемое сочетание механической прочности, газообмена и сохранности продукта при длительном хранении.

В качестве базы (матрицы) упаковочных пленок наибольшее распространение получили полиэтилен (ПЭ) низкого и высокого давления, полипропилен (ПП), а также сополимеры этилена с полярными мономерами (ЭВА, ЭМА) и полиамиды для многослойных структур. Полиолефины обеспечивают технологичность (экструзия, раздув, ориентирование), химическую стойкость и приемлемый уровень прочности, однако нуждаются в модификации для повышения газо и паронепроницаемости, износостойкости и адгезии к другим слоям.

Функциональные свойства композиционных пленок целенаправленно формируются за счет введения минеральных наполнителей (тальк, карбонат кальция, бентонит), органофильных наноглин, а также органических модификаторов и пластификаторов. Минеральные наполнители позволяют регулировать модуль упругости, термостойкость, горючесть и стоимость материала, тогда как нанодисперсные частицы за счет высокой удельной поверхности обеспечивают рост барьерных свойств при относительно низком содержании (единицы массовых процентов). Например, в работе по деградируемым полимерным композиционным материалам показано, что введение бентонита в композиционные пленки на основе полиэфилов и полиолефинов повышает механическую прочность и одновременно позволяет варьировать скорость деструкции в условиях эксплуатации упаковки.

Композиционные пленки можно условно разделить на два основных типа:

- высокобарьерные (PET/AlO_x/PE, BOPET/EVON/PP), где защита от кислорода, влаги, УФ-излучения составляет $<1 \text{ см}^3/\text{м}^2/\text{сут}$;
- среднебарьерные (BOPP/PE/EVON), где показатели проникновения $>1 \text{ см}^3/\text{м}^2/\text{сут}$.

Среднебарьерные композиции используются при упаковке продукции, как правило, на сроки, не превышающие 24 часа. Длительные сроки хранения обеспечивают высокобарьерные пленки первой группы [5].

Характерным примером первой группы может быть структура типичной шестислойной пленки, состоящей из: BOPP-Полипропилена (12 мкм); ПНД-бимодала (20 мкм); EVON-Сополимер этилена (5 мкм), ПНД (связующий); PP (40 мкм); гидрофильной поверхностно-активной композиции.

При таком составе базовыми полимерами являются ПНД-бимодал и BOPP-полипропилен [1, 9].

Бимодальный полиэтилен (ПНД) марок HD80520 FE, FB2310, RE4FE-73 обеспечивает прочность $>30 \text{ Н}/25 \text{ мм}$ при толщине 20 мкм, низкий уровень гелеобразования ($<20 \text{ шт}/\text{м}^2$), возможность снизить толщину на 15%, а полипропилен (BOPP) выполняет функции несущего слоя с модулем упругости 2 – 3 ГПа и прозрачностью $>92\%$, идеален для ламинирования.

Входящие в состав пленки EVON – сополимер этилена (5 мкм), ПНД (связующий), PP (40 мкм), гидрофильная поверхностно-активная композиция являются барьерными, связующими и функциональными слоями соответственно.

Технология производства такой пленки состоит из соэкструзии (одновременное выдувание/вытяжка 5 – 11 слоев), ламинирования (безадгезионное/адгезионное соединение BOPP + ПЭ) и напыления (покрытие) [1,8, 9].

С инженерной точки зрения, композиционный подход к проектированию защитных и упаковочных пленок обеспечивает возможность «конструирования» целевого набора свойств за счет управляемого сочетания матрицы, наполнителей, функциональных слоев и режимов переработки. Это особенно актуально для пленочных материалов, работающих в жестких условиях

транспортировки и хранения (перепады температур, влажность, механические нагрузки), где необходимо одновременно обеспечивать механическую стойкость, стабильность размеров, устойчивость к деструкции и сохранность упакованного продукта в течение всего жизненного цикла.

Необходимо отметить, что повышенная влажность полимерного сырья (гранулята) до переработки является одной из типичных причин браку тонких пленок и снижения их механической стойкости. Сверхнормативное влагосодержание приводит к образованию пористости и внутренних дефектов (микрополостей, «пузырей»), а также к появлению характерных «серебристых полос» и других визуальных дефектов на поверхности изделий, сопровождающихся падением прочности и разрушением при меньших нагрузках. Такие дефекты критичны для упаковочных и защитных пленок, толщина которых невелика, а эксплуатационные нагрузки (растяжение при упаковке, удар при погрузке/разгрузке, локальные напряжения в узлах крепления) высоки – внутренняя пористость и межслойные дефекты становятся концентраторами напряжений и инициаторами трещин.

Исследуемые в диссертации многокомпонентные смеси для выпуска пленки, применяемой для упаковки продукции деревообрабатывающей промышленности, поставляемой на экспорт, также можно отнести к высокобарьерным композициям первой группы. Базовыми компонентами пленки являются полипропилен Н030 и бимодал FB2310 в соотношении 14:83, а в качестве барьерного, связующего и функционального материала использовался краситель 1060 ПЭ, УФ-стабилизатор 4000006-Е, меловая полимерная добавка 175 Е.

Такое соотношение компонентов в сырьевой композиции и регламентация режимов подготовки гранул (в частности, их равномерная сушка перед экструзией) формально создают предпосылки для получения пленок с требуемой несущей способностью и стойкостью к разрыву при эксплуатации транспортной упаковки, в том числе при пониженных температурах и повышенной влажности. Однако результаты проведенных исследований показали, что на практике при существующем уровне организации производства сохраняются

существенные технологические проблемы, приводящие к снижению долговечной стойкости пленочных материалов, что обуславливает необходимость анализа текущего состояния дел в полимерной индустрии при выпуске защитных и упаковочных пленок [7, 60, 69].

Мировой успех полимерной отрасли наглядно проявляется в долговременном росте объемов производства и потребления пластмасс и синтетического каучука как сырья для промышленности. С 1950 года ежегодный выпуск пластмасс увеличился почти в 200 раз: с 2 млн. тонн до 400 млн. тонн в 2019 – 2023 гг., при этом к 2019 году совокупное накопленное производство превысило 9 млрд. тонн. Если в 1950 – 1970-е годы динамика носила нелинейно-экспоненциальный характер, то в последние десятилетия темпы несколько стабилизировались: в 2000 – 2020 гг. глобальный объем производства пластмасс и полимерных каучуков практически не изменился, что эквивалентно ориентировочному приросту 4 – 5% за каждое десятилетие (рисунок 1). Однако наблюдаются незначительные различия в зависимости от региона, разновидности продукции или сферы ее применения [4].

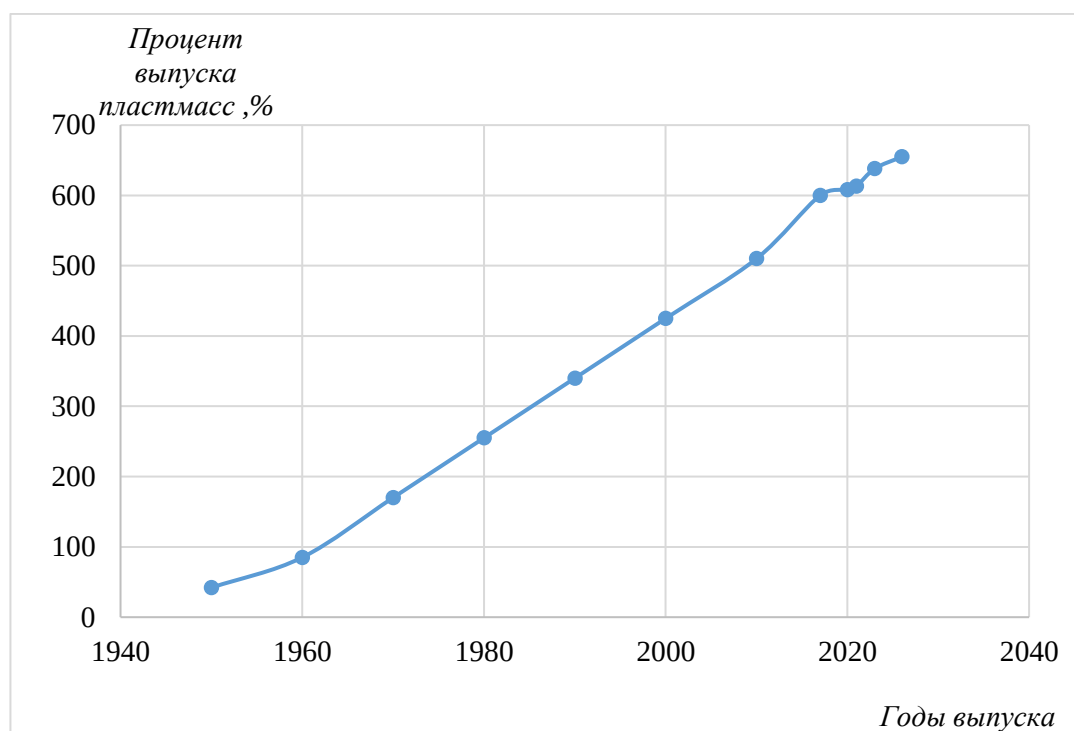


Рисунок 1 – Объем и прогноз выпуска пластмасс и каучука в качестве производственного сырья

Главным фактором мирового роста отрасли по-прежнему остается увеличение численности населения планеты, а также увеличения его уровня жизни. Непрерывный рост показывает основные сферы сбыта пластмасс и особо хотелось бы отметить, что это, прежде всего, упаковка продуктов, товаров, различных изделий и полуфабрикатов при их транспортировке и хранении, а также производство всевозможных емкостей (рисунок 2).

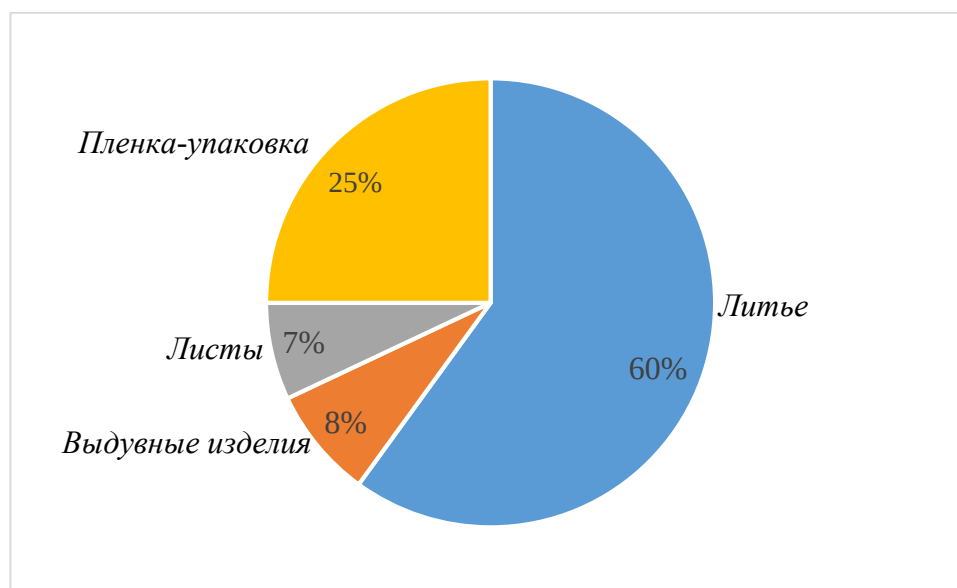


Рисунок 2 – Количество предприятий в РФ по видам изделий

Все эти сферы применения пластмасс и каучуков вносят свой вклад в мировое признание и распространение полимерных материалов на рынках по всему миру [12,20].

Согласно статистике KI Polyglobe, в 2019 году объем производства термопластов, самого большого сегмента по видам пластмасс, достиг почти 337 миллионов тонн в год. При этом более 93% от общего объема приходится на стандартные (базовые) пластмассы, остальные 7% на биопласты и биоразлагаемые полимеры [3, 69].

Объемы производства полимеров в странах Азиатско-Тихоокеанского региона существенно повлияло на показатели статистики: лидером стал Китай с долей рынка 29%, который вместе с Японией (4%) и другими Азиатскими странами (17%) довели совокупный показатель до 50%. «За последние десятилетия структура мирового рынка пластмасс существенно

изменилась в пользу азиатского региона. К началу 2020-х годов Китай стал крупнейшим производителем пластмасс в мире. Его доля в глобальном выпуске пластиковых материалов достигла примерно 32 – 33%, тогда как на остальную Азию (без Китая и Японии) приходится еще около 19%. – 20%. На этом фоне позиции Европы и Северной Америки ослабли: доля Европы в мировом производстве пластмасс снизилась с порядка 28% в начале 2000-х до примерно 12% – 14% к 2022 – 2023 годам, доля Северной Америки составляет около 17%.

Регионы Ближнего Востока и Африки в совокупности занимают порядка 8 – 9% мирового производства пластмасс, на страны Центральной и Южной Америки приходится около 4%, Япония дает порядка 3%. Таким образом, за последние 20 – 25 лет Азия в широком смысле смогла увеличить свою долю в глобальном производстве пластмасс с примерно 30% до более чем 50%, тогда как Северная Америка и Европа потеряли по несколько десятков процентов относительной доли рынка в пользу азиатских производителей [6, 3].

К 2024 году объем производства пластмасс в первичных формах в России достиг 10,9 млн. т, что на 1,9% превысило результат 2023 года и составляет примерно 20 – 25% от общей стоимости продукции химической промышленности (по оценкам, порядка 1,5 – 2 трлн. руб.). По данным Росстата, в 2024 – 2025 гг. производство полимерных изделий и пластмасс демонстрирует устойчивый рост (например, + 4,3% в январе 2025 г.), несмотря на рост затрат на энергию и сырье.

В структуре экспорта химической продукции пластмассовые изделия составляют менее 5% (из-за низкой конкурентоспособности базовых полимеров), тогда как в импорте их доля превышает 20 – 25% (импорт готовых изделий в 2023 – 2024 гг. вырос до 1,03 – 1,15 млн. тонн). Таким образом, перерабатывающая промышленность пластмасс остается ключевой отраслью для задач импортозамещения в России [68].

Российская Федерация потребляет около 6,35 млн. тонн, из них 5,4

млн тонн – термопласты, 950 тыс. тонн – смолы, производится 5,6 млн тонн (рисунок 3). Экспорт 300 000 тонн, импорт 1 млн. тонн, на душу населения ~48 кг/чел.

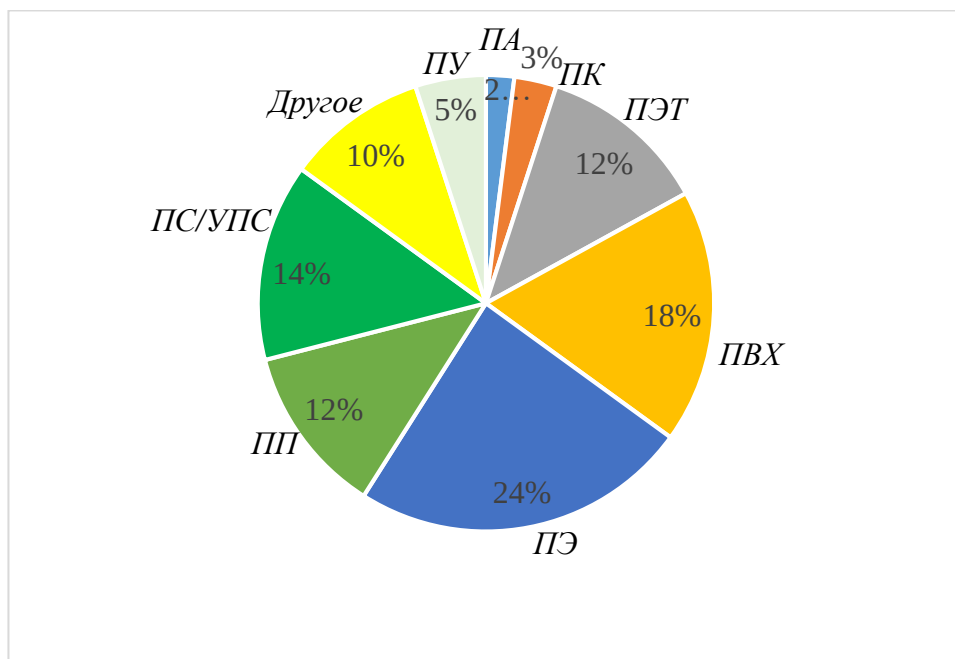


Рисунок 3 – Соотношения произведенных полимеров в России

Диаграмма показывает, что наибольшую долю в общем объеме производства пластмасс занимают полипропилен (ПП) и полиэтилен (ПЭ). Доли других термопластов (поливинилхлорид (ПВХ), полиэтилентерефталат (ПЭТ), полиамиды (ПА), поликарбонаты (ПК), полиуретаны (ПУ)) заметно ниже. Такое преобладание ПП и ПЭ непосредственно коррелирует с тем, что именно они являются базовыми матрицами для выпуска большинства упаковочных пленочных материалов. Они обеспечивают технологичность переработки (экструзия пленок, раздув, ориентирование), достаточную механическую прочность и устойчивость к действию влаги и химических сред, что делает их основой для однослойных и многослойных упаковочных пленок различного назначения. В совокупности представленные данные подтверждают, что высокий удельный вес полипропилена и полиэтилена в структуре производства пластмасс обусловлен прежде всего масштабами и значимостью отрасли упаковки, где именно полипропилен и полиэтилен формируют основной ассортимент пленочной продукции.

Таким образом, по оценкам отраслевых обзоров, глобальное производство пластмасс (без волокон) находится на уровне порядка 400 – 450 млн. т в год, при этом на упаковку приходится около 40 – 45% всего потребления пластмасс, что делает упаковку крупнейшим направлением их использования. Для пластиковой упаковки как отдельного сегмента объем оценивается порядка 130 – 140 млн. тонн в год с устойчивым ростом. Прогнозируется, что доля пластиковой упаковки в структуре рынка пластмасс к середине 2030-х годов приблизится к 40% и более [3,6, 38, 91].

На основе типичной структуры использования пластмасс можно ориентироваться на следующую усредненной оценки долей, представленную на рисунке 4, где упаковка – 42%, строительство – 19%, электротехника и электроника – 17%, автопром – 9%, прочие применения (товары народного потребления, медицина, сельское хозяйство и др.) – 13% [7, 69, 91] (рисунок 4).

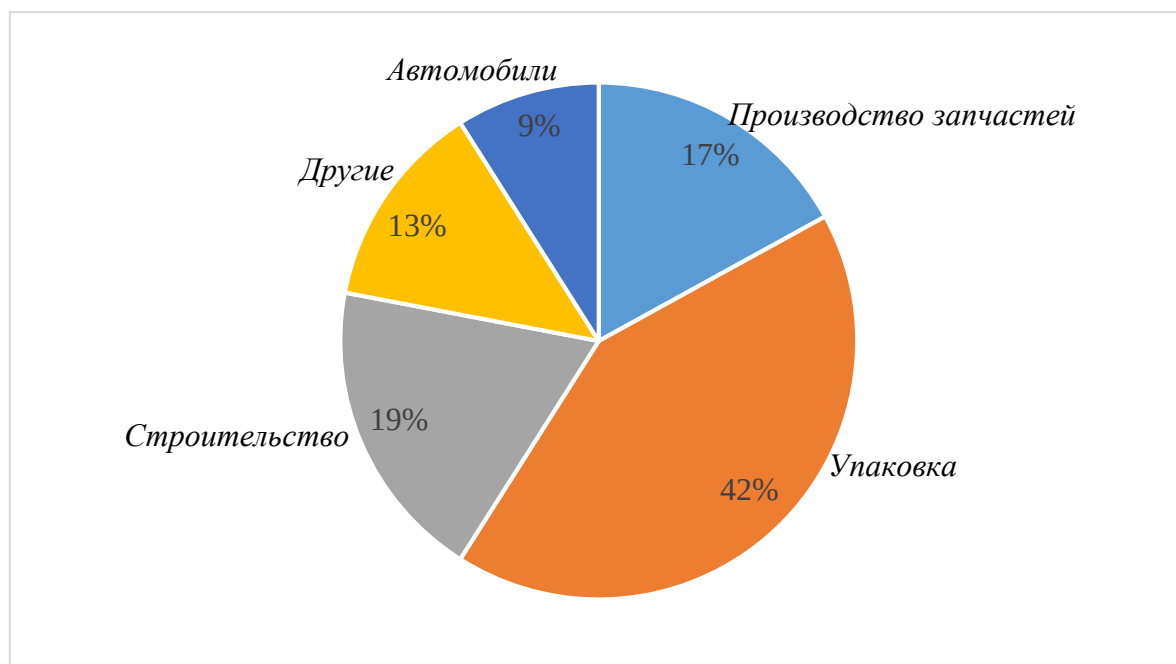


Рисунок 4 – Мировое использование пластмасс по секторам промышленности

Диаграмма иллюстрирует ключевой факт того, что упаковка является крупнейшим сектором потребления полимерных материалов базовыми материалами которого, являются полимеры ПП (полипропилен) и ПЭ (полиэтилены) (рисунок 4).

По данным российских отраслевых обзоров и аналитики индустрии пластмасс, Россия входит в число крупнейших производителей и переработчиков пластмасс, а за последние годы объемы переработки пластиков позволили стране войти в топ 10 – ти мировых рынков. В структуре внутреннего потребления пластмасс в РФ также доминирует упаковочная отрасль. Она оценивается следующим образом, представленным на рисунке 5, где упаковочные материалы составляют 30 – 40% общего потребления пластмасс, что сопоставимо с мировой тенденцией, тогда как строительство занимает около 25%, а остальные сегменты: авто – 10%, электротехника – 8%, сельское хозяйство – 7%, товары народного потребления – 15% имеют меньшие доли [7, 69].

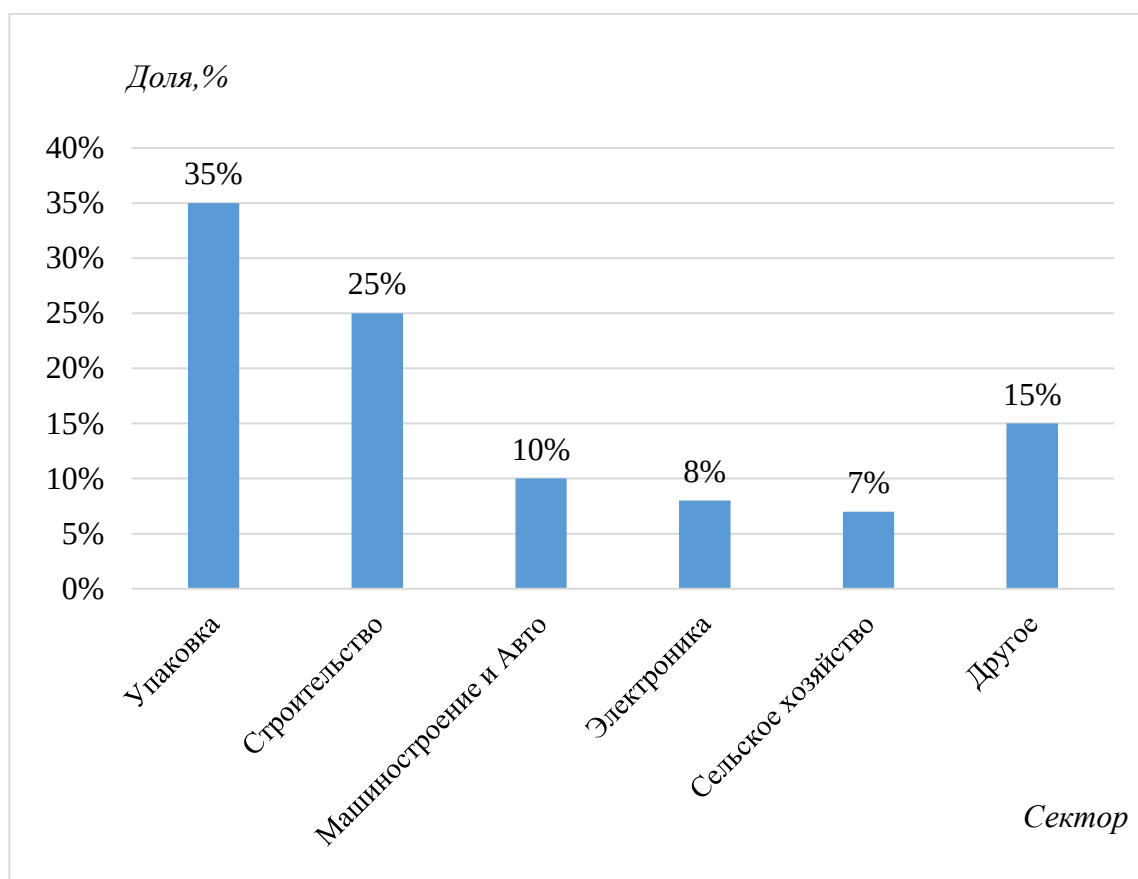


Рисунок 5 – Распределение потребления пластмасс по секторам в России

Этот график отображает, что, как и в мире, в России (рисунок 5) упаковка является крупнейшим направлением для использования пластмасс, а упаковочные пленки занимают существенную долю (35%) в общем объеме переработки полиолефинов и других полимеров.

По уровню переработки полимеров Российская Федерация отстает от развитых стран. В 2018 году потребление пластика на душу населения составило 48 кг/чел. в России, 177 кг/чел. в США, 151 кг/чел. в Германии, 123 кг/чел. в Италии, 92 кг/чел. во Франции и 79 кг/чел. Великобритания.

Отрасль зависит от импортного оборудования, возможности модернизации и автоматизации которого существенно ограничены, что предопределяет отставание по объему выпускаемой продукции. Эту проблему также подтверждают исследования, проведенные на ООО «ТД ЗПМ» в г. Ангарске.

Рассматриваемое производственное подразделение осуществляет взаимодействие с рядом деревообрабатывающих предприятий и выпускает упаковочные пленки, используемые при транспортировке экспортируемых пиломатериалов. В течение последнего десятилетия на предприятии фиксируются случаи разрушения упаковочной пленки на этапах транспортировочного цикла, включающего хранение, перевозку, погрузочно-разгрузочные операции, при которых материал испытывает воздействие ультрафиолетового излучения, влаги и температурных колебаний. Возникающее при этом снижение эксплуатационных характеристик упаковочного материала обуславливает ухудшение сохранности экспортируемого сырья и приводит к предъявлению претензий к качеству упаковки, а также к дополнительным внепроизводственным затратам предприятия; так, за период 2021 – 2025 гг. сумма штрафных санкций составила 2530 тыс. руб.

Несмотря на сохраняющиеся проблемы в области обеспечения требуемого уровня качества упаковочной продукции, производство указанных материалов на предприятии не было приостановлено, что свидетельствует о высокой практической значимости задачи стабилизации и повышения их потребительских и эксплуатационных свойств. В этой связи была проведена предварительная работа, включавшая сбор и анализ статистических данных по объемам забракованной продукции, а также экспериментальное исследование возможных причин формирования дефектов качества. Установлено, что действующая си-

система контроля качества поступающего на завод полимерного сырья, его подготовки к переработке и контроля готовой продукции в значительной степени носит субъективный характер вследствие отсутствия средств автоматизированного контроля параметров.

С учетом выявленных особенностей организации контроля на предприятии и для анализа причин, определяющих снижение механические свойства полимерных материалов, далее были рассмотрены основные условия их формирования, а также совокупность технологических и эксплуатационных факторов, оказывающих влияние в процессе производства и эксплуатации упаковочной пленки.

Учитывая доминирующую роль упаковочных полимерных материалов в совокупном объеме потребления пластмасс, а также их критическую значимость для обеспечения сохранности продукции при хранении и транспортировании, исследование факторов, влияющих на механические свойства и эксплуатационную надежность защитных и упаковочных пленок, представляется научно обоснованным и востребованным.

1.2 Факторы, влияющие на механические свойства полимерных изделий из пленочных материалов

Полимерные пленочные материалы, применяемые для упаковки товаров, сырья и материалов, в процессе эксплуатации подвержены механическим воздействиям, приводящим к разрыву и воздействию агрессивных факторов внешней среды: температуры, ультрафиолетового излучения и др. Также общеизвестным фактом является то, что влияние влаги на механические свойства полимерных материалов оказывает преобладающее значение.

Установлено, что повышение влагосодержания приводит к выраженному снижению их механической прочности: так, для полиамидов показано уменьшение модуля упругости и жесткости вплоть до 60 – 70% при сорбции

влаги из влажной атмосферы и водных сред [46]. Аналогичные закономерности выявлены в диссертационных исследованиях, посвященных влиянию жидких сред и влаги на механические свойства полиэтилена, полипропилена и других конструкционных полимеров, где отмечено снижение прочности при растяжении на 20 – 40% и более в присутствии воды и водных растворов [19].

Многочисленные исследования [16, 96] показывают, что практически все виды полимерных материалов независимо от их степени полярности в той или иной мере гигроскопичны. Данный факт указывается в государственных стандартах (ГОСТ 4650-73) [38] и нормативно-технической документации поставщиков полимерного сырья и материалов. Характеристики основных пластических масс представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики основных пластических масс

Вид пластмассы	Водопоглощение, %
Полиэтилен	0,01
Полистирол	0,05
Фторопласт-4	0
Органическое стекло	0,3
Полиуретан	0,1 – 2,0
Текстолит	1,5
Гетинакс	1 – 2,5

Кроме того, в ряде диссертационных работ и методических материалов по переработке полимеров [22, 79] указывается, что повышенное содержание влаги в полимерном сырье (грануляте) при экструзии и формовании изделий приводит к образованию пор, снижению однородности структуры. И, как следствие, к браку продукции и уменьшению прочности при растяжении и ударной вязкости по сравнению с изделиями, полученными из нормативно высушенного сырья [74]. Подобные выводы содержатся и в обобщающих работах, посвященных влиянию влажностного состояния на изменение свойств полимерных материалов, где показано формирование дефектной структуры и снижение несущей способности при увеличении влагосодержания [28].

Экспериментальные исследования, проведенные на предприятии ООО «ТД ЗПМ» показали, что основным фактором, влияющим на качество выпускаемой продукции, является повышенная влажность в исходном сырье. Прочностные показатели пленочных изделий в зависимости от содержания влаги в исходном сырье показаны на рисунке 6.

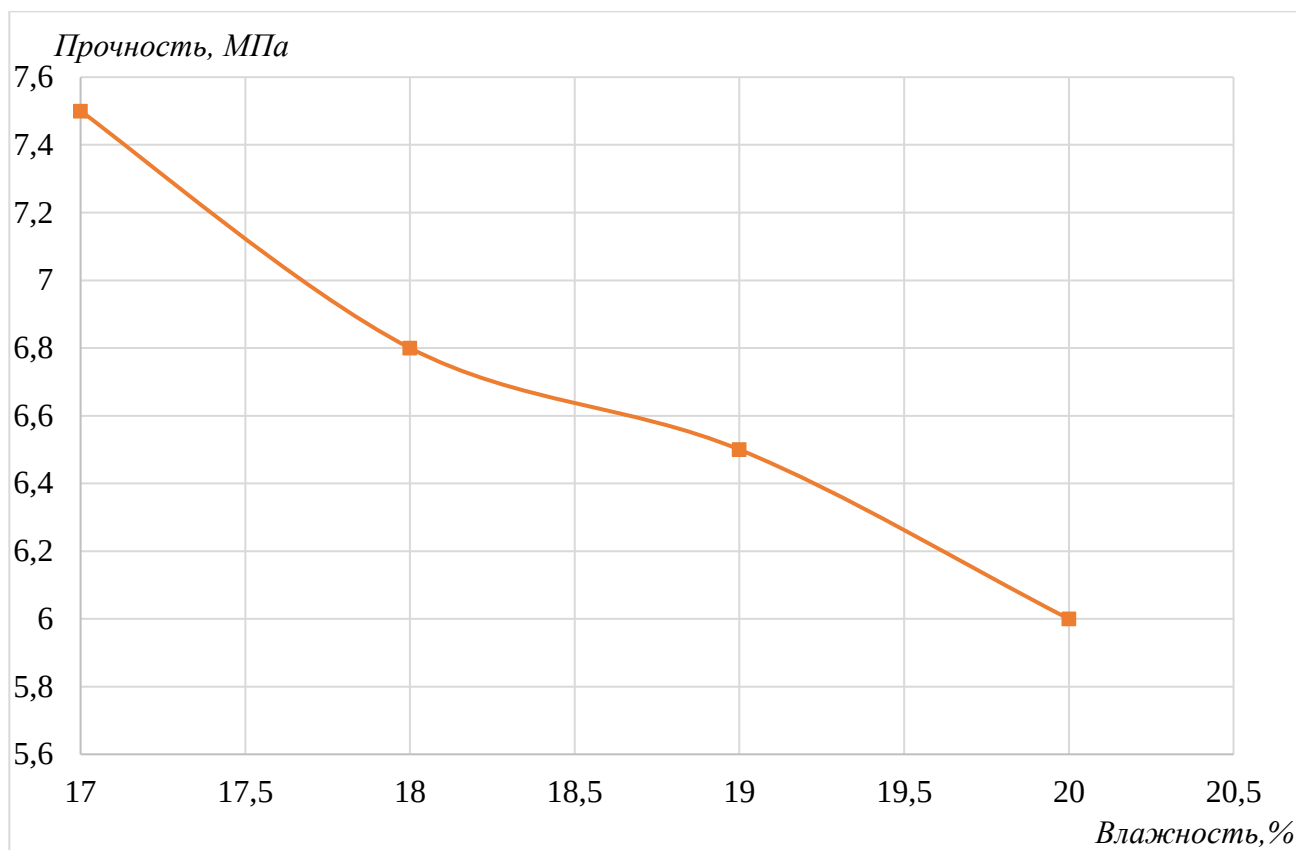


Рисунок 6 – Прочностные показатели пленочных изделий в зависимости от содержания относительной влаги в исходном сырье

Анализ результатов эксперимента показывает, что с ростом влажности гранулята наблюдается монотонное снижение прочности пленки на разрыв. При содержании влаги: 17% прочностные показатели составляют 7,5 МПа; 18% прочностные показатели снижаются до 6,8 МПа; 19% влаги показывают прочность в пределах 6,5 МПа; 20% прочность на разрыв 6 МПа соответственно. Полученные данные согласуются с выводами литературных источников и требованиями нормативно-технической документации к технологии изготовления полимерных пленок методом литья, согласно которым для обеспечения требуемых прочностных характеристик допускается ограниченный диапазон массо-

вой доли влаги в сырье. Регламентируются рекомендуемое ниже влагосодержание полимеров.

Полученные результаты позволяют утверждать, что с увеличением содержания влаги в исходной смеси для изготовления пленочных материалов происходит заметное снижение их прочностных характеристик. При этом важно учитывать, что на рассматриваемом предприятии логистическая схема включает поставку готовой продукции, в том числе водным транспортом, что сопровождается повышением влажности окружающей среды и, соответственно, дополнительным ухудшением механической прочности поставляемого сырья в процессе транспортирования. В связи с изложенным следующая подзадача исследования была ориентирована на анализ и систематизацию существующих методов, способов и технических средств сушки полимерного сырья, применяемого при производстве полимерных пленок, с целью обоснования выбора рациональной технологии удаления влаги.

1.3 Энергоэффективные методы совместной термической обработки смеси слабополярных и неполярных полимерных материалов

Физические основы процессов сушки полимерных материалов были подробно рассмотрены в специализированной литературе [48, 54], где показано, что к основным способам удаления влаги из полимеров относятся механические и термические методы обработки. Механическая сушка, реализуемая с использованием винтовых ситовых центрифуг, обеспечивает снижение влагосодержания лишь до порядка 5% по массе, что многократно превышает технологически допустимые значения остаточной влаги для полимерного сырья (таблица 2) [27].

Таблица 2 – Допустимые значения остаточной влаги для полимерного сырья

Полимер	Абсолютная влажность в % по массе полимера
ПЭНП (полиэтилен низкой плотности)	0,02
ПЭВП (полиэтилен высокой плотности)	0,02
ПП (полипропилен)	0,02
ПС (полистирол)	0,2
АБС – пластик	0,2
САН (сополимер стирола)	0,1
ПВХ (поливинилхлорид)	0,2
ПММА (оргстекло)	0,06
ПА6 (полиамид)	0,1 – 0,2
ПЭТ (полиэтилентерефталат)	0,16
ПБТ (полибутилентерефталат)	0,12
ТПУ (термополиуретан)	0,03

В связи с этим данный способ не может рассматриваться как основной и достаточный метод подготовки полимеров к переработке, что служит обоснованием для исключения механической сушки из регламентируемых операций технологического процесса.

Термическая сушка в зависимости от теплопроводности материала, конвекции на границе слоев и мощности излучения может снизить уровень влажности до 0,2% от массы. Отвод испаряемой влаги производится сушильными агентами (воздух, перегретый пар, топочные газы), которые насыщаются влагой, диффундирующей с поверхности материала. При этом сушка является, с одной стороны, диффузионным процессом, с другой – тепловым, к которым можно отнести конвективный и кондуктивный способ

Конвективный способ является самым распространенным. Высушиваемому материалу энергия передается с помощью конвекционных процессов. Как было указано в качестве сушильного агента используется нагретый воздух, топочные газы или перегретый пар. Особенностью конвективной сушки является перенос влаги внутри продукта происходящий за счет термовлагопроводности в виде жидкости и в виде пара. Теплоносителем и влагопоглотителем в этом случае является сушильный агент. Этот метод является простым, с возможностью широкого регулирования температурой

высушиваемого материала. К недостаткам можно отнести тот факт, что направление воздействия температуры, противоположно градиенту влагосодержания, что тормозит удаление ее из материала. В связи с этим у данного способа сушки весьма невысоки коэффициенты теплоотдачи от сушильного агента к поверхности материала (11,6 – 23,2 Вт/м²К). Поэтому важную роль при конвективной сушке являются параметры самого агрегата [48, 61, 62].

Кондуктивный способ основан на контакте материала с горячей поверхностью. Конвекция, организованная при этом способе, служит для удаления пара и воздуха, являющегося влагопоглотителем. Отсюда коэффициент теплоотдачи при этом способе в разы выше, чем при конвективной сушке. Температура на границах слоев и материала различна: максимальная у слоя, имеющего контакт с греющей поверхностью, наименьшая у поверхностного слоя. Содержание влаги при процессе сушки данным способом увеличивается к поверхностному слою. На примере вальцевых установок время сушки зависит от пути, пройденного высушиваемой частицей вдоль вальца, от радиуса и частоты вращения вальца, расчет данного времени рассчитывается по формуле (1). Толщина пленки высушиваемого материала определяется зависимостью (2). Условием необходимым для данного способа сушки является надежный контакт высушиваемого материала с греющей поверхностью. Время сушки на примере вальцевых установок определяется по формуле (1):

$$\tau = \frac{30 \cdot l}{\pi \cdot n \cdot R}, \quad (1)$$

где l – длина пути; пройденного высушиваемой частицей вдоль вальца, м;
 n – частота вращения вальца (1 об / мин = 1 мин⁻¹ = 0,10472 рад / с);
 R – радиус вальца, м.

При этом глубина высушиваемого материала определяется зависимостью (2):

$$\delta = \frac{M_1}{120 \cdot \rho_m \cdot n \cdot l \cdot L}, \quad (2)$$

где M_1 – количество материала, поступающего на сушку, кг/ч;

ρ_m – плотность высушиваемого материала, кг/м³;

L – длина вальца, м.

Недостатками метода является невозможность сохранения качества сушки материала, так как при контакте материала с нагретым оборудованием, он подвергается необратимым термическим превращениям (деструкции). Также недостатком является - наличие дорогостоящего оборудования, а время сушки до 3,5 – 4,5% влажности может достигать 5 – 17 часов.

Анализ технологических режимов наиболее распространенного и дешевого метода сушки с использованием бункерной установки (таблица 3) показывает, что время процесса сушки, по сравнению с кондуктивным способом сокращается в несколько раз, но при подготовке полимерного сырья остаточная влажность также превышает допустимые нормы (таблица 2).

Таблица 3 – Режим сушки полимеров в бункерной сушилке

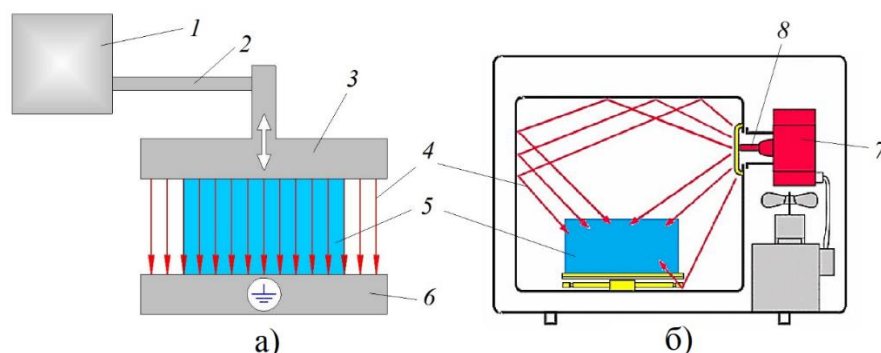
Полимер	Режим сушки в бункерной сушилке	
	Температура, С°	Время, час
ПП	90	1–2
ПС	70–80	1–2
УПС	70 –75	1–2
АБС	70 –50	2–3
САН	70–90	2–3
ПВХ	60–70	1
ПММА	70–90	3–4
ПК	110–120	6–8
ПА6	75–0	8–10
ПЭТ	4-6	130
ПБТ	2–3	30
ТПУ	100-110	1–2
ПЭНП	70–80	1–2
ПЭВП	30–90	1–2

В 80-х годах прошлого века были достигнуты хорошие экспериментальные результаты при сочетании вакуумной и диэлектрической сушки. В качестве источников энергии использовались высокочастотные (ВЧ) генераторы, работающие на частотах 5,28 МГц, 13,56 МГц, 26 МГц, 30 МГц. Однако из-за громоздкости оборудования эти сушилки не получили распространения. На рынке сушки представлены вакуумные камеры с затратами на сушку древесины от 50 кВт/м³ для сушки древесины от начальной влажности 60% до конечной влажности 10%. Такие низкие затраты производители объясняют образованием холодного тумана или сжатием практически всей влаги в жидкой фазе. Особенно важно, чтобы скорость конденсации пара внутри камеры была больше или равна скорости испарения влаги. Из-за фазовых переходов жидкость-пар-жидкость система охлаждения камеры должна отводить от конденсации пара столько же тепла, сколько тепла расходуется на испарение воды.

Стенка вакуумной камеры должна быть в десять раз толще стенки ВЧ-камеры, что приводит к увеличению металлоемкости камеры.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что вакуумные сушильные камеры не экономичны. Поэтому целесообразно рассмотреть более подробно сушку полимерных материалов в поле токов высокой частоты.

Разогрев полимерных материалов в ВЧ-поле происходит за счет релаксационных и поляризационных процессов, вызванных смещением под действием поля электрических зарядов и связанных с ними молекул, что приводит к выделению тепловой энергии в диэлектрике, следовательно, источником тепла является сам объект. Одним из основных преимуществ этого метода является высокая скорость процессов, обеспечивающая практически безынерционный равномерный нагрев всего объема до эффективных температур обработки изделия, в том числе материалов с низкой теплопроводностью [53]. Упрощенно процесс воздействия ВЧ и СВЧ энергии на диэлектрик можно представить в виде схемы, заимствованной из работ авторов нашей научной школы ИрГУПС [22, 55, 98] приведенной на рисунке 7.



1 – высокочастотный генератор; 2 – коаксиальная линия передачи ВЧ-энергии; 3 – подвижная высокопотенциальная плита рабочего конденсатора; 4 – поток электромагнитного излучения; 5 – нагреваемый объект; 6 – низкопотенциальная плита рабочего конденсатора; 7 – СВЧ-генератор (магнетрон); 8 – СВЧ-волновод

Рисунок 7 – Схема воздействия ВЧ – (а) и СВЧ-энергии (б) на полимерный диэлектрик

В указанных работах научной школы ИрГУПС достаточно подробно описано преимущество данного вида нагрева и научно обоснована наиболее эффективная частота ВЧ-энергии $f=27,12$ МГц, но в них недостаточно полно затрагивался вопрос ВЧ-нагрева неполярных материалов и физики этого процесса.

1.4 Физические процессы высокочастотного нагрева и системы управления при ВЧ-обработке слабополярных и неполярных полимерных материалов, используемых при производстве защитных и упаковочных пленок АСУ ТП ВЧ-сушки

При нагреве полимеров в переменном высокочастотном электрическом поле протекает ряд связанных физико-электрических процессов, характерных для диэлектриков [52, 54].

Поляризация и ориентация диполей:

1. При помещении полимерного материала между электродами, к которым

подведено высокочастотное напряжение f МГц, в объеме полимера возникает переменное электрическое поле.

2.Макромолекулы и фрагменты цепей, обладающие дипольным моментом (полярные группы, звенья с асимметричным распределением зарядов), стремятся ориентироваться по направлению поля. Поскольку поле меняет направление с частотой f МГц, диполи вынуждены переориентироваться десятки миллионов раз в секунду. Их движение не свободно: ему препятствуют соседние участки цепи и соседние молекулы, поэтому ориентация сопровождается «внутренним трением».

Энергия, затрачиваемая на многократную переориентацию диполей и преодоление этих препятствий, переходит в тепло, что приводит к объемному нагреву полимера, причем глубина проникновения уменьшается с увеличением частоты по следующей зависимости (3):

$$\Delta = \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \operatorname{tg} \delta}, \quad (3)$$

где c – скорость света, км/с;

f – частота поля, Гц;

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

Диэлектрические потери и объемный нагрев. С энергетической точки зрения нагрев обусловлен диэлектрическими потерями в материале.

Часть энергии высокочастотного поля рассеивается в виде тепла за счет запаздывания поляризационного отклика относительно изменения поля (фазовый сдвиг). Вклад в нагрев также дает ионная проводимость (перемещение связанных ионов, примесей, влаги), но для диэлектрических полимеров обычно доминирует именно дипольно-ориентационный механизм.

В отличие от конвективного или контактного нагрева, тепловыделение при ВЧ-обработке происходит сразу во всем объеме, куда проникает поле, поэтому прогрев идет быстро и более равномерно, без выраженного перегрева поверхности.

- интенсивность нагрева определяется частотой поля (f МГц), напряжен-

ностью поля между электродами (E);

- диэлектрическими свойствами материала (диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$, содержание полярных групп и влаги).

Нагрев можно определить по классической формулой электротермии через удельную мощность (4):

$$P_{\text{уд}} = 5,53 \cdot 10^{11} \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (4)$$

где $P_{\text{уд}}$ – удельная мощность диэлектрических потерь, Вт/см³;

E – напряженность электрического поля, В/м;

f – частота поля, Гц;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость;

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

Учитывая зависимость глубины проникновения Δ ЭМВ, напряженности электрического поля E и мощности $P_{\text{уд}}$ от частоты f в полимере показывают, что интенсивность электрического поля уменьшается с увеличением частоты излучения, что в свою очередь уменьшает глубину проникновения ЭМП в материал (рисунок 8).

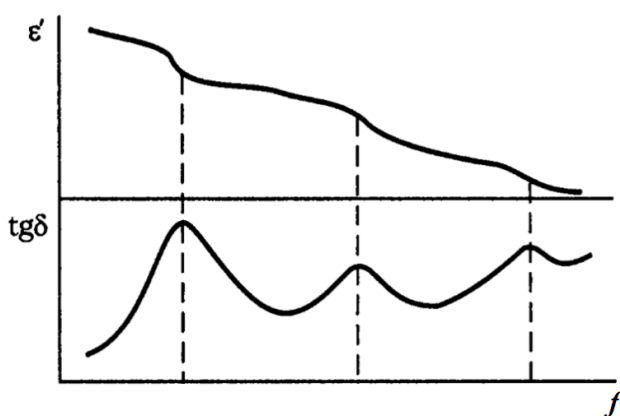


Рисунок 8 – Релаксационный характер зависимостей ε' и $\operatorname{tg} \delta$ от частоты электрического поля

Анализируя эти данные, авторы [58, 98] сделали вывод о целесообразности использования частоты 27,12 МГц, разрешенной для промышленного применения в высокочастотных методах диэлектрический нагрева полимеров.

3. Роль структуры полимера и температуры. По мере роста температуры меняются как подвижность макромолекул, так и диэлектрические характеристики. При нагреве вязкость полимера снижается, возрастает подвижность цепей, диполи переориентируются легче, что может как усилить, так и ослабить нагрев в зависимости от того, насколько частота f МГц соответствует характерному времени релаксации поляризации.

Вблизи температуры стеклования или в зоне перехода к вязкотекучему состоянию ориентационные процессы особенно интенсивны, что способствует эффективному разогреву внутреннего объема материала и переходу его в состояние, пригодное для сварки, формования, уплотнения. Электрофизические параметры материала значительно возрастают, что можно наблюдать в виде экстремумов в их значениях.

4. Нагрев влаго и примесесодержащих полимеров. Наличие влаги и полярных низкомолекулярных примесей дополнительно усиливает нагрев, так как молекулы воды и полярных добавок также обладают дипольным моментом и активно поглощают энергию поля, это особенно заметно в гидрофильных или частично полярных полимерах, где ВЧ-нагрев протекает быстрее, чем в неполярных (чистый полиэтилен, полипропилен). С технологической точки зрения это важно, потому что небольшие различия во влажности или составе могут приводить к неоднородности нагрева по сечению изделия.

5. Пространственное распределение температуры. Полимер в ВЧ-поле, как правило, располагают между металлическими электродами (конденсаторная схема). Максимальная интенсивность поля, а значит и максимальное тепловыделение, приходится на объем между электродами, т.е. на зону, куда нужно передать тепло. За счет объемного характера нагрева температура в глубине полимера может быть выше, чем у поверхности, контактирующей с более холодными электродами, что позволяет избегать поверхностного перегрева и деформации.

6. Ограничения и режимы. При росте напряженности поля увеличивается скорость нагрева, но существует предел, выше которого возможно пробивание

материала и разряд между электродами. Поэтому режимы ВЧ-нагрева (напряженность, время воздействия, нагрузка) подбирают так, чтобы обеспечить нагрев до требуемой температуры, избежать электрического пробоя и локального перегрева, сохранить макромолекулярную структуру и минимизировать термоокислительную деструкцию. Авторами школы электротермии ИрГУПС был найден способ управления в режиме предпробойного состояния по динамике возникновения частичных разрядов $K_{дчр}$ [22, 55].

Однако следует отметить, что не все полимерные материалы чувствительны к ВЧ-воздействию, в связи с чем в работе [61] был определен перечень таких материалов (таблица 4).

Таблица 4 – Электрофизические свойства полярных и неполярных полимеров

Материал	Полярность		Диэлектрическая проницаемость ϵ''	Тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$	Фактор потерь ϵ''
	Полярный	Неполярный			
Полипропилен		+	2,0	0,0001	0,0002
Полистирол		+	2,4-2,7	0,0001-0,002	0,00024-0,0054
Политетрафторэтилен		+	1,9-2,2	0,00025	0,000475-0,00055
Полиизобутилен		+	2,4-2,9	0,0005	0,0012-0,0015
Полиэтилен бимодальный		+	1,0502	0,0032	0,0034
Полиэтилентерефталат		+	3,0	0,002	0,006
Политрифторхлорэтилен	+		2,5-3,0	0,01	0,025-0,030
Поликарбонат	+		3,0	0,01	0,03
Ацетобутират целлюлозы	+		3,2-6,2	0,01-0,04	0,032-0,248
Ацетил целлюлоза	+		3,2-7,0	0,01-0,10	0,032-0,70
Поливинилацеталь	+		2,7	0,016	0,042
Поливинилхлорид Жесткий	+		2,8-3,4	0,015-0,04	0,042-0,136
Полиметилметакрилат	+		2,9-3,2	0,02-0,03	0,058-0,096
Полиамид	+		3,8-4,2	0,025-0,03	0,090-0,128

Продолжение таблицы 4

Материал	Полярность		Диэлектрическая проницаемость ε''	Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$	Фактор потерь ε''
	Полярный	Неполярный			
Поливинилхлорид Пластифицированный	+		3,3-4,5	0,04-0,09	0,132-0,405
Поливинилиденхлорид	+		3,0-5,0	0,05-0,08	0,150-0,400
Поливинилбутираль	+		3,3-3,9	0,06	0,198-0,234

При ВЧ-нагреве неполярных полимеров (типичный пример – ПЭ, ПП) картина заметно отличается от поведения сильнополярных диэлектриков, и это важно учитывать при обосновании технологии. В неполярных полимерах практически нет постоянных дипольных групп, поэтому ориентационная поляризация выражена слабо. Основной вклад дают смещение электронных и ионных облаков внутри макромолекул (электронная и ионная поляризация) и незначительная ориентация индуцированных диполей. Эти процессы происходят очень быстро и сопровождаются меньшими диэлектрическими потерями, чем в полярных полимерах, поэтому удельное объемное тепловыделение ниже.

У ПЭ и ПП тангенс угла диэлектрических потерь мал, поэтому при одинаковой напряженности поля они поглощают меньше энергии и нагреваются медленнее, чем полярные материалы. На практике это означает, что будет меньшая скорость роста температуры при тех же параметрах установки, что потребует необходимость увеличивать мощность/время воздействия либо использовать добавки (полярные сополимеры, пластификаторы, влага), чтобы сделать, нагрев более эффективным.

Известно, что даже для неполярного полимера небольшое количество полярных примесей или влаги сильно влияет на нагрев и именно они начинают поглощать ВЧ-энергию и локально разогреваться. Возникает избирательная концентрация температурного поля на участках с зонами повышенной влажности или концентрации добавок. Поэтому для неполярных полимеров особенно

важен состав и контроль влажности.

Из-за малых потерь нагрев неполярного диэлектрика при правильно подобранной частоте и мощности идет равномерно по всему объему, без перегрева поверхности. Однако скорость выхода на рабочую температуру будет несколько ниже, чем у полярных материалов. Чувствительность к изменениям свойств (фазовый переход через температуру стеклования/плавления, изменение тангенса потерь с температурой) меньше, чем у полярных полимеров и поэтому явных экстремумов в их значениях наблюдаться не будет.

Также достаточно широко используется метод присадки, например, для сварки/формования неполярных полимеров, в ВЧ-поле обычно используют специальные композиции (сополимеры, слои/прослойки с полярными компонентами) размещаемые между соединяемыми неполярными материалами.

Для неполярных полимеров высокочастотный нагрев характеризуется сравнительно медленным, хотя и потенциально достаточно однородным прогревом по объему.

Таким образом, можно сделать вывод, что для полярных полимерных материалов высокочастотный нагрев определяется, прежде всего, дипольно-ориентационной поляризацией, и именно поэтому на частотно-температурной зависимости тангенса диэлектрических потерь для них наблюдаются выраженные экстремумы (максимумы) при совпадении времени релаксации диполей с периодом поля потери. В области таких экстремумов полярные материалы нагреваются наиболее интенсивно, что одновременно повышает риск локального перегрева и термодеструкции и требует точного подбора режимов. В отличие от них, для неполярных полимеров, не имеющих развитой дипольной поляризации, подобные выраженные максимумы диэлектрических потерь практически отсутствуют. Их частотно-температурные зависимости гораздо более сглажены, а удельное поглощение энергии ВЧ-поля и скорость нагрева существенно ниже по всему диапазону частот, нагрев неполярного диэлектрика идет равномерно по всему объему, без перегрева поверхности.

Решению задач автоматизации управления технологическими процессами электротермии посвящены исследования отечественных и зарубежных авторов: Архангельский Ю.С., Донской С. Н., Юленец Ю.П., Калганова С.Г., Коновалов А.А., Румынский А.В., Н.П., Марков А.В., Федорова И.Г., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Буторин Д.В., Potente H., Tinga W., Nilson S. и др.

Схема автоматизированной системы управления процессом ВЧ-обработки изделий из пластмасс сложной формы, предложенная [92] расширяет представление о возможной конфигурации АСУ ТП за счет учета геометрической сложности изделий (рисунок 9).

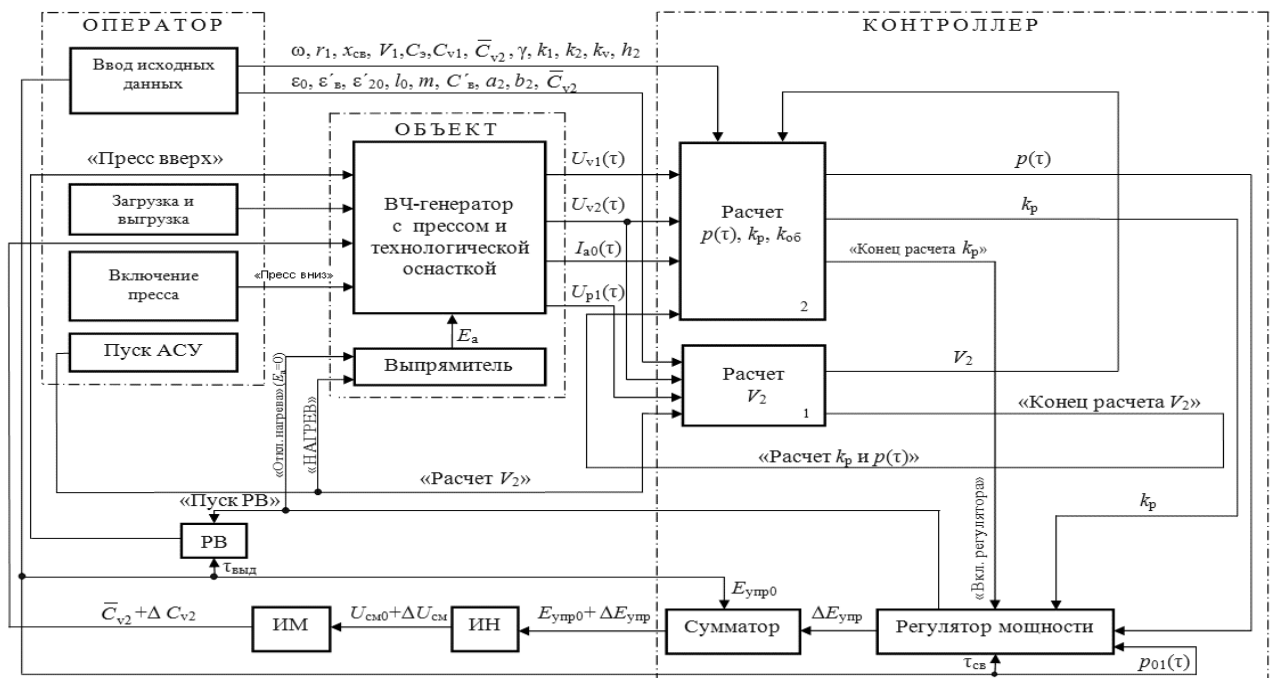


Рисунок 9 – Структурная схема автоматизированной системы управления процессом ВЧ-обработки изделий из пластмасс сложной формы

В структуре системы выделены блоки, отвечающие за управление положением пресса, организацию загрузки и разгрузки, а также за согласованную работу ВЧ-генератора с технологической оснасткой. В состав измерительной части входят датчики тока и напряжения, а также модули согласования с выпрямителем и регулятором мощности, что позволяет реализовать замкнутый контур по интегральным характеристикам процесса. Недостатком такой системы является сложность определения большого количества исходных, вводимых

данных, $(\omega, r_1, \chi_{cb}, V_1, C_3, C_{v1}, C_{v2}, \gamma, k_1, k_2, k_v, h_2, \varepsilon_0, \varepsilon_z, 0, l_0, m, C = a_2, d_2, C_{v2})$, что требует от оператора высокой квалификации, при выполнении простой технологической операции неразъемного соединения. При этом, несмотря на усложненную геометрию объекта управления, в алгоритмах регулирования фактически используются те же усредненные параметры материала, а вопросы контроля локальных перегревов, неоднородности поля и перераспределения мощности в многокомпонентных полимерных композициях остаются вне рамок рассмотрения.

Блок-схема автоматизированной системы управления процессом ВЧ-сушки изделий из полимерных материалов, разработанная [98], демонстрирует структуру АСУ ТП для электротермических процессов отличительной особенностью, которой являются контуры защиты от пробойных явлений и системой ступенчатого регулирования мощностью (рисунок 10).

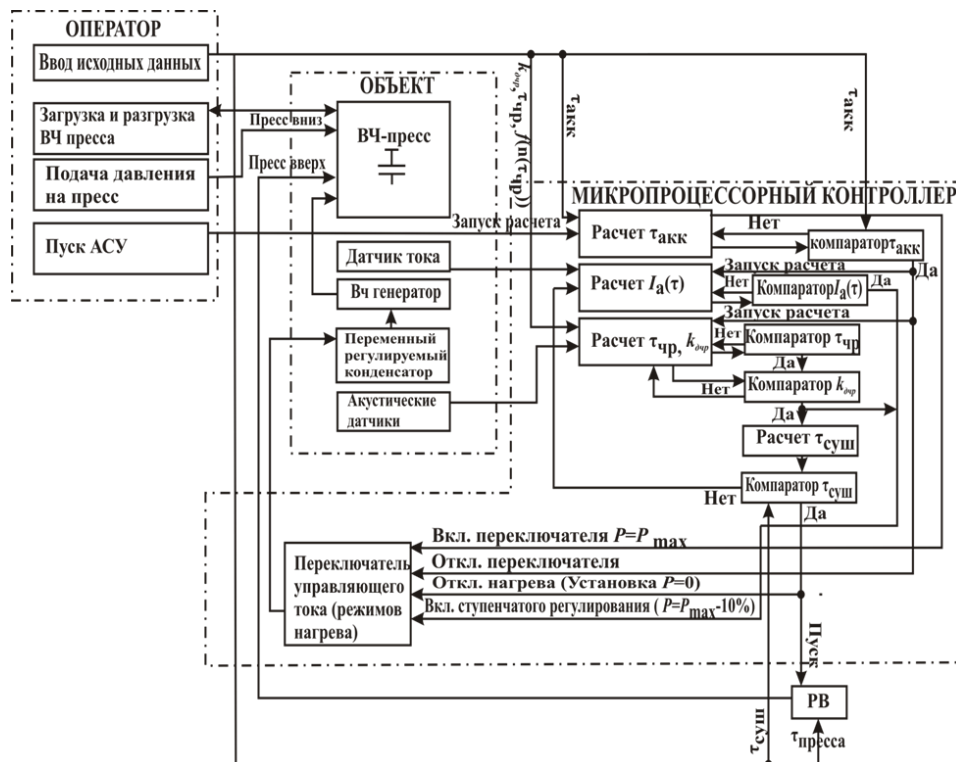


Рисунок 10 – Структурная схема АСУ процессом ВЧ-сушки изделий из полимерных материалов

Особое внимание уделено вводу исходных технологических параметров, расчету текущей мощности, поддержанию требуемого давления пресса и обес-

печению заданного технологического режима. Вместе с тем, система ориентирована на обработку изделий из однокомпонентных по составу полимеров и не предусматривает адаптивной подстройки под изменяющиеся электрофизические характеристики многокомпонентных смесей, в которых различия в полярности компонентов приводят к неравномерному распределению поля и температуры.

На еще более детализированном уровне построена блок-схема алгоритма работы контроллера, реализующего технологические процессы ВЧ-сушки и восстановления прочностных свойств полимерных изделий (рисунок 11), разработанная [22].

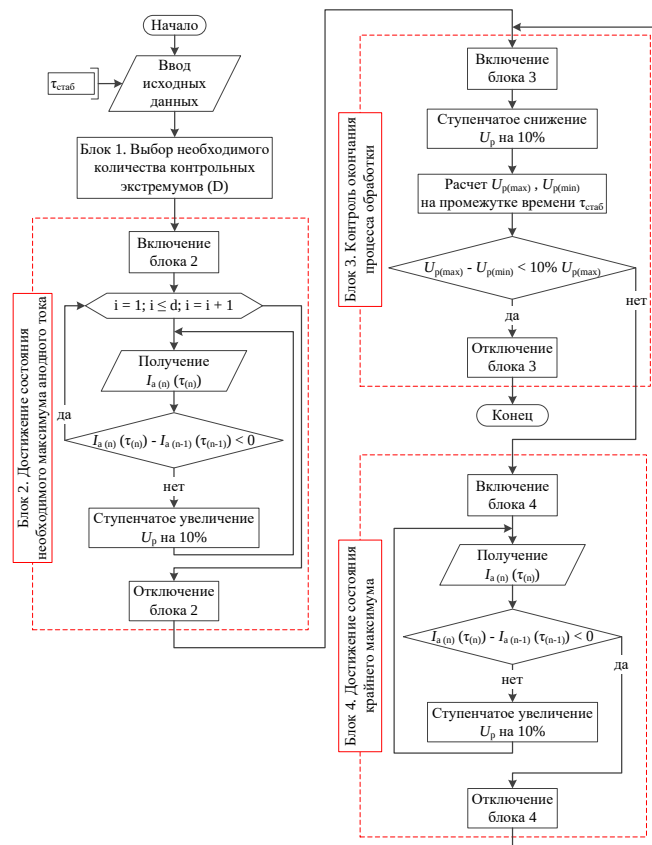


Рисунок 11 – Блок-схема алгоритма работы контроллера, реализующего технологические процессы ВЧ-сушки и восстановления прочностных свойств полимерных изделий

В схеме последовательно описываются этапы вычисления времени технологических выдержек, расчета требуемых токов и напряжений ВЧ-генератора, а также процедура сравнения текущих значений с заранее за-

данными порогами. Использование контроллера позволяет реализовать сложные последовательности включения и выключения исполнительных механизмов, поэтапное изменение мощности нагрева и автоматический переход между режимами сушки и стабилизации свойств материала. Тем не менее даже при такой глубине проработки алгоритмической части технологическая система трактуется как однородная среда с фиксированными параметрами, а возможные изменения диэлектрической проницаемости, проводимости и релаксационных характеристик полимерной композиции по мере удаления влаги и перераспределения компонентов фактически игнорируются.

Если рассмотреть совокупность приведенных схем, можно отметить, что во всех случаях структура АСУ ТП строится по схожим принципам: оператор задает исходные технологические параметры, измерительные каналы формируют сигналы о текущем состоянии объекта, а контроллер осуществляет расчет управляющих воздействий для ВЧ-генератора и исполнительных устройств пресса. Эксплуатационные характеристики систем во многом определяются выбором контролируемых параметров – времени, температуры, влажности, давления, тока и напряжения и принятыми зависимостями между ними и требуемой мощностью нагрева. Однако ни одна из рассмотренных реализаций не использует в качестве обратной связи динамические воздействия изменяющихся электрофизических и теплодинамических характеристик многокомпонентных полимерных материалов друг на друга, не учитывает сложное пространственно-временное распределение нагрева при интенсивном охлаждении материала при вынужденном вентилировании с целью удаления продуктов сушки. Управление осуществляется по интегральным или усредненным показателям, что приемлемо для однородных полярных диэлектриков, но принципиально недостаточно для систем, содержащих слабополярные и неполярные компоненты.

С учетом изложенного можно утверждать, что существующие блок-схемы и алгоритмы АСУ ТП ВЧ-сушки, представленные выше, демонстрируют лишь частные решения задач автоматизации электротермии. Они ориентированы на ограниченный круг объектов и базируются на ряде идеали-

зирующих допущений о свойствах материала и характере протекания тепло-массообменных процессов. Для многокомпонентных полимерных композиционных систем упаковочного назначения, включающих сочетание полярных, слабополярных и неполярных компонентов, до настоящего времени не предложены специализированные структуры АСУ ТП, не определены перечни информативных контролируемых параметров и не разработаны алгоритмы управления, использующие изменяющиеся во времени электрофизические и теплофизические свойства материала. Выявилось, что при большом разнообразии электрофизических контролируемых и управляемых параметров не представляется возможным организовать АСУ ТП не организовав, математическое моделирование процесса. Именно ликвидации этого пробела и посвящено дальнейшее развитие теоретических и практических решений настоящей диссертационной работы.

1.5 Анализ существующих математических моделей процессов высокочастотной обработки полимерных материалов и их использование при построении АСУ ТП

В направлении математического моделирования процессов ВЧ-нагрева работали многие ученые, при этом практически все мат модели построены на основе использования уравнения нестационарной теплопроводности с учетом внутреннего источника тепла. Модели отличаются друг от друга различной степенью детализации, используемыми упрощениями в зависимости от поставленных задач и формируемых технологических систем. Кроме этого необходимо отметить, новый класс рассматриваемых задач поставленной школой электротермистов ИрГУПС—обработка термопластичных полимеров различной степени полярности. Рассмотрим основные математические модели в хронологии их появления.

2005г – Румынский С.Н. [79] рассматривал нагрев двух наложенных друг на друга листов материала бесконечной длины и ширины в высокочастотном электрическом поле рабочего конденсатора (рисунок 12).

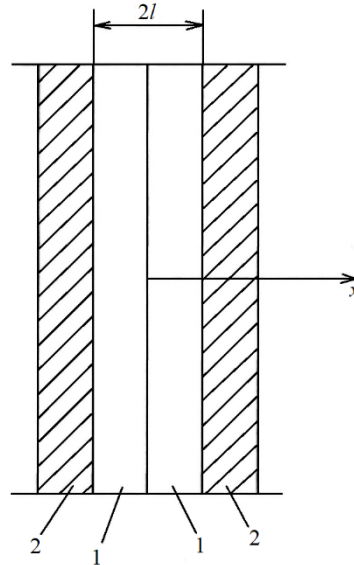


Рисунок 12 – Описание математической модели процесса высокочастотной сварки полиамидов, где 1 – образец полиамида; 2 – электроды

Тогда уравнение нестационарной теплопроводности, описывающее одномерное температурное поле в выбранной системе при внутренних источниках тепла, можно автор получил в виде (5), (6):

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{(c_p(T) \cdot \rho) \cdot \partial^2 T / \partial x^2} + \frac{p(\tau)}{(c_p(T) \cdot \rho)}, \quad (5)$$

$$T|_{\{\tau = 0\}} = T_n, 0 < x < l, T|_{\{x = l\}} = T_e, \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)|_{\{x=0\}} = 0, \quad (6)$$

где T – локальная температура материала;

T_e – температура электрода рабочего конденсатора;

l – полутолщина материала (толщина свариваемой детали);

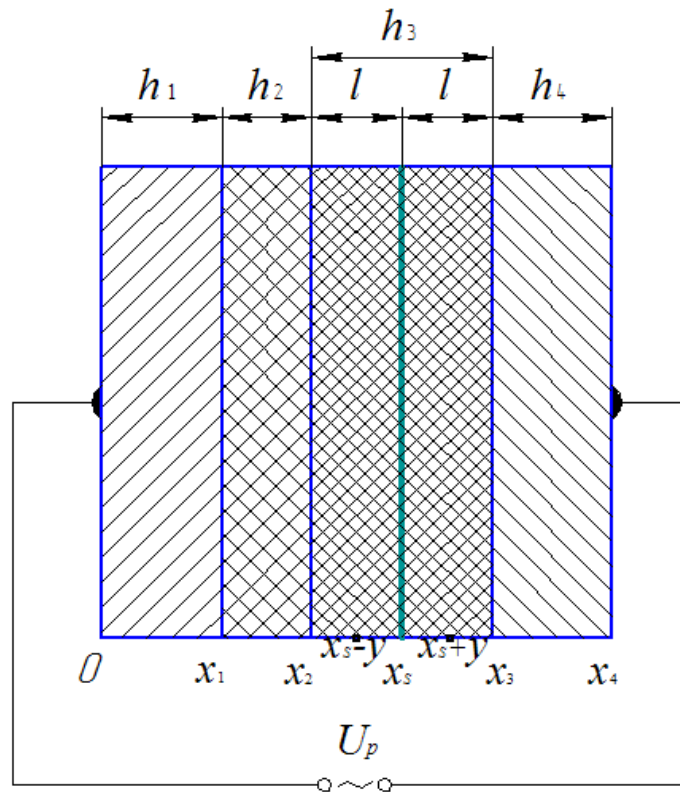
x – координата (текущая толщина);

$x = 0$ – свариваемая поверхность (шов);

c_p, ρ, λ – соответственно удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности материала.

Приняв большое количество упрощений $a_t = \lambda / (c_p \cdot \rho)$, $c_p = \text{const}$, $\lambda = \text{const}$, $\rho = \text{const}$ автором было получено аналитическое решение уравнения нестационарной теплопроводности.

2011 год – Трофимов Н.В. [92], в отличие от предыдущего автора его математическая модель рассматривает, нагрев несимметричной технологической системы с одним термоизолятором (рисунок 13), но также при сохранении значительной доли упрощений $c_p = \text{const}$, $\lambda = \text{const}$, $\rho = \text{const}$.

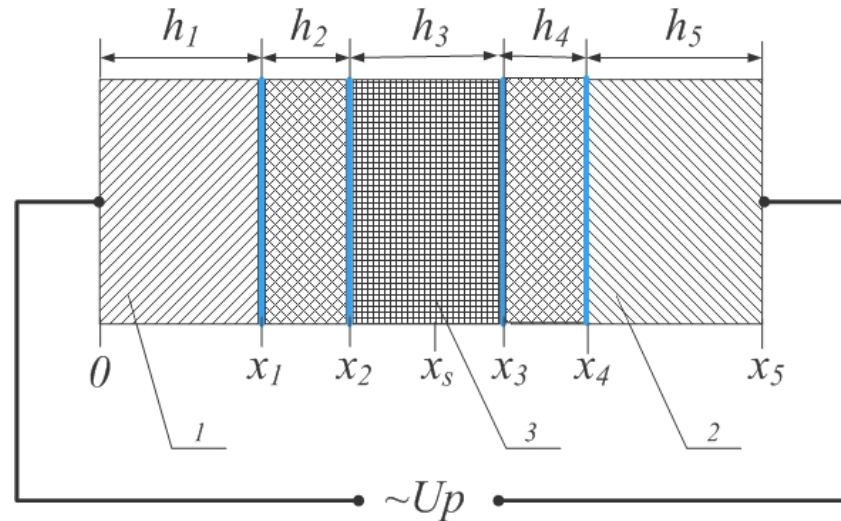


h_1, h_4 – толщина высокопотенциального и заземленного электродов; h_2 – толщина изоляционного вкладыша; $l = h_3/2$ – толщина свариваемой детали; x_i – координата границы слоя; x_s – координата сварного шва; y – расстояние от сварного шва; U_p – напряжение на рабочем конденсаторе

Рисунок 13 – Высокочастотная сварка деталей из пластмасс в технологической оснастке с одним изолированным электродом

Существует множество научных и промышленных школ, пытающихся решить проблемы управления с помощью моделей электротермического нагрева. Анализ существующих решений находит отражение практически в каждой работе школы ВЧ-электротермии ИрГУПС. Поэтому далее рассмотрим наибо-

лее приемлемые к нашей задаче модели электротермии полимерных материалов. 2013 год – Попов С.И. [73] математическая модель усложнена (рисунок 14).



h_1, h_5 – толщина высокопотенциального 1 и заземленного 2 электродов;
 h_2, h_4 – толщины изоляционных вкладышей; h_3 – термопласт; x_i – координаты границ слоев; x_s – координата точки максимального разогрева термопласта 3;
 U_p – напряжение на рабочем конденсаторе

Рисунок 14 – Высокочастотная обработка деталей из пластмасс в технологической оснастке с двумя изолированными электродами конденсатора

При формировании математической модели процесса сушки полимерных материалов обоснованно добавлено два электро-теплоизолятора с рассмотрением их влияния на процесс нагрева и использованием различных толщин изоляторов для смещения зоны максимального нагрева.

2014 г – Ларченко А.Г. [55, 56], рассматривала мат моделирование процесса ВЧ-нагрева применительно к диагностированию различных изделий и термопластичных полимеров (рисунок 15). Была усложнена технологическая система, произведено разбиения полимерного массива на две части при рассмотрении металлического включения, как дополнительного высокочастотного электрода.

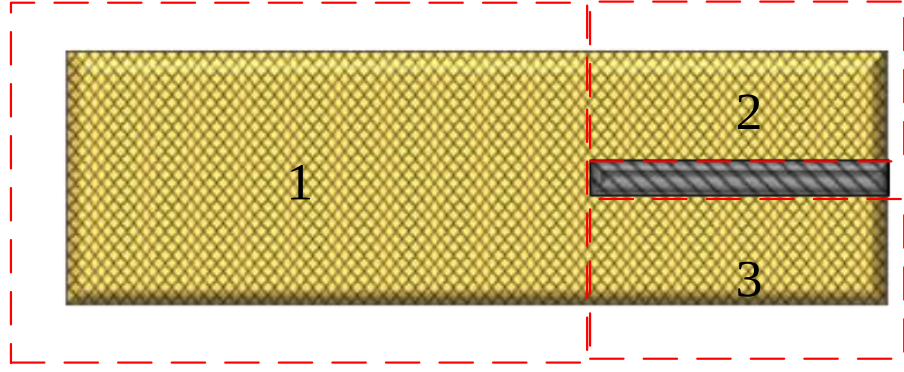


Рисунок 15 – Схема смоделированного образца с дефектом типа металлическая пластина

Математическая модель ВЧ-нагрева получила дальнейшее развитие в работах Буторина Д.В., Лившица А.В., Филиппенко Н.Г. Модель была усложнена до 3D-постановки (рисунок 16), (7) с введением температурозависимых физических параметров полимеров $\lambda_i(T_i)$, $C_{pi}(T_i)$.

Технологическая система при этом включает в себя изменяемое количество: электродов, изоляторов и обрабатываемых материалов.

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{11}C_{p11}(T_{11})\frac{\partial T_{11}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_{11}(T_{11})\frac{\partial T_{11}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_{11}(T_{11})\frac{\partial T_{11}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_{11}(T_{11})\frac{\partial T_{11}}{\partial z}) \\ \rho_{1k}C_{p1k}(T_{1k})\frac{\partial T_{1k}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}k(T_{1k})\frac{\partial T_{1k}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_{1k}(T_{1k})\frac{\partial T_{1k}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_{1k}(T_{1k})\frac{\partial T_{1k}}{\partial z}) \\ \rho_{21}C_{p21}(T_{21})\frac{\partial T_{21}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_{21}(T_{21})\frac{\partial T_{21}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_{21}(T_{21})\frac{\partial T_{21}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_{21}(T_{21})\frac{\partial T_{21}}{\partial z}) + P_{21}(T_{21}) \\ \rho_{2m}C_{p2m}(T_{2m})\frac{\partial T_{2m}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_{2m}(T_{2m})\frac{\partial T_{2m}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_{2m}(T_{2m})\frac{\partial T_{2m}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_{2m}(T_{2m})\frac{\partial T_{2m}}{\partial z}) + P_{2m}(T_{2m}) \\ \rho_{31}C_{p31}(T_{31})\frac{\partial T_{31}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_{31}(T_{31})\frac{\partial T_{31}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_{31}(T_{31})\frac{\partial T_{31}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_{31}(T_{31})\frac{\partial T_{31}}{\partial z}) \\ \rho_{3s}C_{p3s}(T_{3s})\frac{\partial T_{3s}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_{3s}(T_{3s})\frac{\partial T_{3s}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_{3s}(T_{3s})\frac{\partial T_{3s}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_{3s}(T_{3s})\frac{\partial T_{3s}}{\partial z}) \end{array} \right. , \quad (7)$$

где ρ_i , $\lambda_i(T_i)$, $C_{pi}(T_i)$ – плотность, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость материала k -го, s -го и m -го слоя i -той группы технологической системы соответственно;

T_i – температура k -го, s -го и m -го слоя i -той группы технологической системы;

P_{2m} – удельная мощность m -го внутреннего источника тепла 2-ой группы технологической системы;

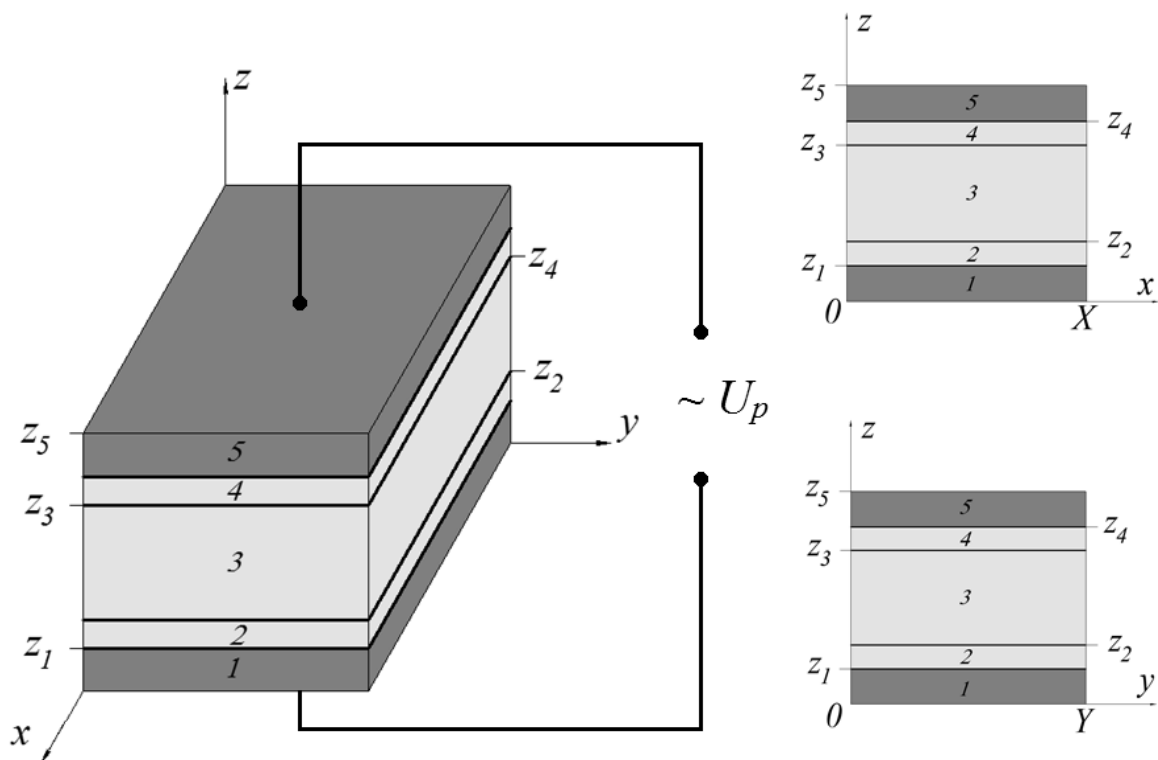
τ – время; $i = 1 \dots 3$ – номер группы технологической системы: 1 – группа

высокопотенциального электрода, 2 – группа внутренних источников тепла, 3 – группа низкопотенциального электрода;

k – количество слоев 1-ой группы технологической системы;

m – количество слоев 2-ой группы технологической системы;

s – количество слоев 3-ей группы технологической системы.



1-ую группу технологической схемы составляют: 1 – низкопотенциальный электрод рабочего конденсатора, 2 – изолятор; 2-ую группу: 3 – обрабатываемый полимер (внутренний источник тепла); 3-ью группу: 5 – высокопотенциальный электрод рабочего конденсатора, 4 – изолятор; X , Y , z_i – координаты границ слоев; U_p – напряжение на рабочем конденсаторе

Рисунок 16 – 3D пятислойная технологическая схема ВЧ-обработки

В вышеуказанных работах впервые, применительно к ВЧ-обработке была введена классификация полимеров по их степени полярности.

Рассмотренные математические модели ориентированы на ВЧ-обработку изделий из полиамида и не пригодны для описания процессов сушки многокомпонентных полимерных материалов. В них используются упрощенные граничные условия: теплообмен технологической системы с окружающей средой

считается пренебрежимо малым, что допустимо лишь при кратковременном нагреве первых заготовок и приводит к искажению температурных полей при длительных процессах сушки. Изменение диэлектрических свойств с температурой и влажностью фактически учитывается только через расчетно-экспериментальное задание удельной мощности, без явной связи с реальным составом, структурой и законом чередования слоев многокомпонентного материала. Кроме того, нагрев анализируется только для полярных полимеров при допущении неизменности коэффициентов теплоотдачи вследствие быстротечности процесса, что неприемлемо для неполярных и слабополярных полимеров, особенно в смесях.

1.6 Постановка цели и задач диссертационного исследования

Исходя из вышеизложенного, сформулирована цель диссертационной работы: повышение энергоэффективности 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.

2 Автоматизация исследований электрофизических параметров слабополярных и неполярных полимерных материалов

В первой главе на основе литературно-патентного обзора было показано, что высокочастотная электротермия является одним из наиболее перспективных направлений интенсификации процессов нагрева и термообработки термопластичных полимеров, особенно в задачах подготовки сырья и повышения эксплуатационных свойств изделий. Для материалов с выраженной полярностью влияние ВЧ-нагрева исследовано достаточно полно, накоплен обширный экспериментальный и расчетный материал, а также предложены математические модели и системы управления. В то же время поведение слабополярных и неполярных полимеров в электромагнитном поле высокой частоты изучено существенно хуже, что затрудняет как корректный выбор режимов обработки, так и построение адекватных моделей и АСУ ТП для таких объектов. Это позволяет рассматривать процесс высокочастотной совместной обработки многокомпонентных смесей слабополярных и неполярных термопластичных материалов в качестве самостоятельного объекта управления, требующего уточнения его физико-технических характеристик и разработки специализированных методов контроля. В последующих параграфах данной главы будут рассмотрены особенности ВЧ-нагрева таких полимеров, методы определения их электрофизических параметров и построение экспериментальной базы для последующего моделирования и синтеза систем управления.

2.1 Особенности процесса высокочастотного нагрева слабополярных и неполярных полимеров и устройства его реализации как объекта управления

Согласно существующим классификациям [52] термопластичные полимеры по степени полярности подразделяются на неполярные, малополярные, полярные и сильнополярные материалы, что отражается в значениях их диэлектрической проницаемости. В производстве пленочных упаковочных материалов широко используются многокомпонентные смеси, базовыми компонентами которых являются полипропилен ($\varepsilon' \approx 2,2$) и бимодальный полиэтилен ($\varepsilon' \approx 2,564$), относящиеся соответственно к неполярным и слабополярным полимерам. Указанные значения получены при температуре 15 – 35 °С и относительной влажности воздуха 45 – 80% в соответствии с требованиями ГОСТ 22372-77 [36]. При изменении влагосодержания φ полимера и его температуры T , что характерно для реальных режимов сушки и ВЧ-обработки, сведения об электрофизических параметрах этих материалов либо фрагментарны, либо полностью отсутствуют, что обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований и получения зависимостей $\varepsilon'(T)$, $\varepsilon'(\varphi)$, $\operatorname{tg}\delta(T)$, $\operatorname{tg}\delta(\varphi)$. При этом, как показывают литературные данные, даже материалы, традиционно считающиеся негигроскопичными (например, полиэтилены), обладают водопоглощением порядка 0,02 – 0,04%, что уже может оказывать влияние на диэлектрические характеристики в процессах ВЧ-нагрева. Опираясь на предшествующие диссертационные исследования школы высокочастотной электротермии ИрГУПС [22, 58] в качестве объекта управления рассматривалось устройство высокочастотного нагрева (УВН) (рисунок 17).

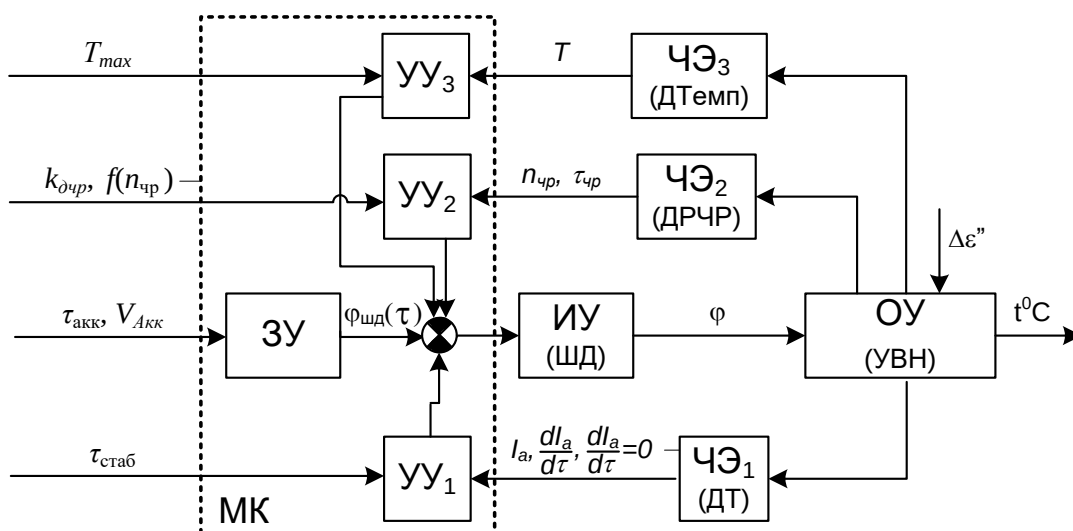


Рисунок 17 – Функциональная схема АСУ ТП высокочастотной электротермии полярных полимеров [58]

При этом в работе [58] в качестве возмущающего воздействия на объект управления (ОУ) рассматривается коэффициент диэлектрических потерь $\Delta \varepsilon''$, отражающий начальное состояние обрабатываемого полимера и изменяющийся в процессе обработки. В качестве контролируемых параметров принимаются: количество (n) и время ($\tau_{чр}$) возникновения частичных разрядов, а также максимально допустимая усредненная температура (T) в месте обработки. Управляющим воздействием является угол поворота шагового двигателя (φ), определяющий уровень энергетического воздействия на полимерные материалы. Данные АСУ использовались для управления электротермией полярных и сильнополярных полимеров, что определило построение экстремальных систем управления с контролем динамики изменения анодного тока I_a объекта управления. При переходе к обработке слабополярных и неполярных полимерных материалов с исходно малыми значениями тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \delta$, и соответственно снижением чувствительности системы управления по анодному току I_a , необходимо учесть возможное использование напряжения $U_{раб}$ на обкладках рабочего конденсатора в качестве нового контролируемого параметра. Объект управления представлен на рисунке 18.

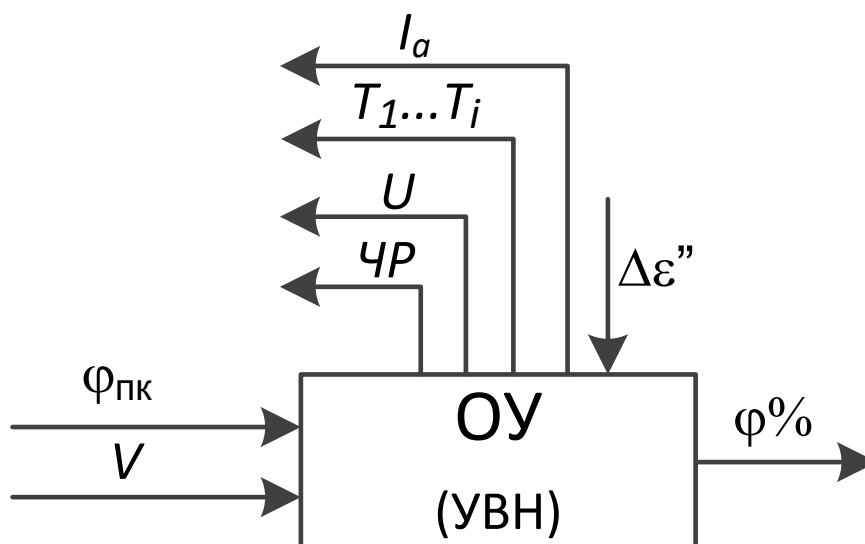


Рисунок 18 – Объект управления высокочастотной электротермии насыпного массива слабополярных и неполярных полимеров

В дальнейших исследованиях для формирования новых алгоритмов управления процессом сушки слабополярных и неполярных полимеров будут рассмотрены особенности технологии сушки с учетом принудительного удаления влаги обдувом (новое управляющее воздействие V – скорость воздушного потока вентилятора обдува) и возможный дополнительный контроль температуры $T_1...T_i$ в целевых точках насыпного полимерного массива.

Указанные обстоятельства формируют комплекс задач, включающий анализ и сравнение существующих методов определения электрофизических параметров полимеров, выявление взаимосвязи между контролируемыми и управляющими параметрами, формирование новых алгоритмов управления процессами именно для слабополярных и неполярных материалов, обоснование состава измерительного оборудования, оснастки, средств автоматизации, алгоритмов и программного обеспечения с учетом их чувствительности, и точности при идентификации параметров процесса сушки.

2.2 Методы определения электрофизических параметров полимеров

Существует широкий спектр методов определения электрофизических характеристик полимерных материалов (емкостные мостовые схемы, методы отражения и пропускания, импедансная спектроскопия, резонансные методы и др.), каждый из которых обладает своими областями применимости, точностью и требованиями к аппаратуре. Мостовые и импедансные методы обеспечивают высокую информативность в широком частотном диапазоне, однако требуют сложной, дорогостоящей аппаратуры и жестких требований к подготовке образцов и компенсации паразитных элементов. Методы на основе отражения и пропускания электромагнитной волны ориентированы преимущественно на СВЧ диапазон и также предъявляют повышенные требования к измерительному тракту и квалификации персонала.

В задачах исследования слабополярных и неполярных полимеров, используемых в составе многокомпонентных смесей для пленочных материалов, ключевым является получение высокоточных температурно влажностных зависимостей диэлектрической проницаемости ϵ' и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ при фиксированной рабочей частоте высокочастотной установки. При этом требуется сочетание высокой чувствительности, относительной простоты аппаратной реализации и доступной стоимости измерительного комплекса, что делает избыточным использование широкополосных СВЧ систем и векторных анализаторов цепей.

С учетом этих требований в настоящей работе в качестве основного электрического метода выбран метод резонансного контура. Образец полимера размещается в измерительной ячейке, входящей в состав LC контура; по изменению резонансной частоты и добротности контура определяются ϵ' и $\operatorname{tg}\delta$ исследуемого материала. Данный подход обеспечивает высокую чувствительность к изменениям электрофизических параметров слабополярных и неполярных полимеров в узкой полосе частот, соответствующей рабочей частоте ВЧ

установки, и реализуется на сравнительно простой и недорогой элементной базе.

Вместе с тем для задач управления процессом ВЧ-сушки принципиально важна не только температурная, но и влажностная «привязка» получаемых электрофизических характеристик. Для этого в состав измерительного модуля целесообразно включить автоматизированный термогравиметрический канал, обеспечивающий регистрацию изменения массы образца во времени при заданном законе нагрева. Термогравиметрия не является прямым методом измерения ε' и $\operatorname{tg}\delta$, однако позволяет оперативно определять влагосодержание $\varphi(T, \tau)$ и, тем самым, связывать результаты резонансных измерений с текущим состоянием материала по влажности. Совместное использование резонансного контура и термогравиметрического измерения в единой автоматизированной системе научных исследований (АСНИ) обеспечивает получение зависимостей $\varepsilon'(T, \varphi)$ и $\operatorname{tg}\delta(T, \varphi)$, необходимых для дальнейшего математического моделирования процесса ВЧ-сушки и синтеза АСУ ТП.

Анализ рассмотренных подходов позволяет сформулировать следующие выводы:

Для получения температурно влажностных зависимостей электрофизических параметров слабополярных и неполярных полимеров при фиксированной рабочей частоте ВЧ установки наиболее целесообразно применение метода резонансного контура, обладающего высокой чувствительностью, достаточной точностью и сравнительно невысокой стоимостью реализации.

Для одновременного контроля влагосодержания образца и последующей привязки ε' и $\operatorname{tg}\delta$ к параметрам процесса сушки в состав измерительного комплекса включается автоматизированный термогравиметрический модуль, работающий согласованно с резонансной измерительной ячейкой.

Интеграция резонансного и термогравиметрических методов в составе единого модуля АСНИ электрофизических свойств обеспечивает получение полного набора идентификационных зависимостей $\varepsilon'(T, \varphi)$, $\operatorname{tg}\delta(T, \varphi)$, необходимых для построения математической модели процесса ВЧ-нагрева и разработки

алгоритмов управления процессом сушки слабополярных и неполярных полимерных материалов.

2.3 Разработка аппаратно-программного модуля автоматизированной системы научных исследований

В рамках данного исследования для определения выше указанных параметров был использован метод резонансного контура, основанный на определении добротности колебательного контура, имеющего в своем составе измерительный конденсатор с размещенным в нем исследуемым полимерным материалом. В качестве такого конденсатора используется измерительная ячейка модели ЭС-1Т, работающая в высокочастотном диапазоне (рисунок 19).



Рисунок 19 – Измерительная ячейка модели ЭС-1Т

Ячейка представляет собой конденсатор с расстоянием между обкладками, регулируемым микрометрическим винтом. Корпус ячейки представляет собой экранированную конструкцию с раздвижным окном для установки и снятия

исследуемого полимерного образца. Диаметры исследуемого полимерного образца и электродов (обкладок конденсатора) в соответствии с ГОСТ 22372-77 принят равным 50 мм [52].

При используемой модифицированной методике измерений частота генератора принимается постоянной величиной $f = 27,12$ МГц, равной разрешенной частоте, используемой в промышленности.

Общеизвестно, что добротность конденсаторов обратно пропорциональна тангенсу угла его диэлектрических потерь и зависит от материала диэлектрика между его обкладками.

В данном случае добротность конденсатора Q с исследуемым диэлектриком (полимером) и, следовательно, тангенс угла диэлектрических потерь определяется по формуле (8):

$$g(T) = \frac{1}{Q(T)} = \frac{(Q_1 - Q_2(T))(C_l - C_L)}{(C_1 - C_2(T))Q_1 Q_2(T)}, \quad (8)$$

где C_L – паразитная емкость индуктивности L ;

C_1 – емкость настроечного конденсатора в схеме колебательного контура без установки измерительной ячейки с полимером и настроенного в резонанс;

Q_1 – добротность конденсатора C_1 ;

C_2 – емкость настроечного конденсатора при подключенной измерительной ячейке к контактам C_x (C_x – емкость измерительной ячейки) (рисунок 20) и контуре, настроенном в резонанс;

Q_2 – добротность параллельного соединения настроечного конденсатора, и измерительной ячейки (ЭС-1Т) с полимером в схеме настроенной в резонанс (рисунок 21).

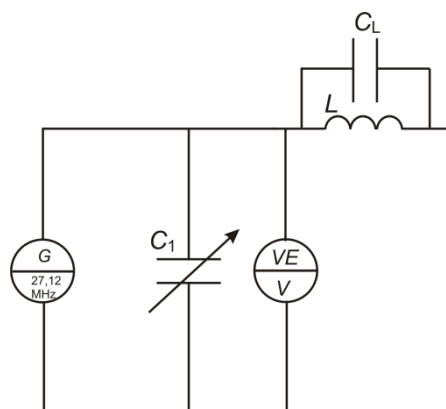


Рисунок 20 – Принципиальная схема определения емкости C_1 резонансным методом измерения диэлектрических свойств полимерных материалов с использованием прибора измерителя добротности ВМ-560

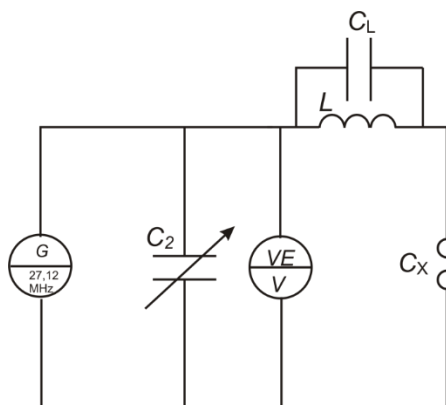


Рисунок 21 – Принципиальная схема резонансного метода измерения диэлектрических свойств полимерных материалов

В рамках настоящей работы измерительная ячейка ЭС-1Т была модифицирована (рисунок 21) с целью расширения ее возможностей при проведении экспериментов по получению зависимостей диэлектрических показателей полимеров от температуры их нагрева [45]. Ячейка была оборудована системой нагрева и теплоизолирована для поддержания заданной динамики нагрева.

Снизить влияние различных электромагнитных помех позволили мероприятия по экранированию ячейки. Для обеспечения равномерного нагрева исследуемого образца и электродов была использована система конвективного нагрева рабочей камеры ячейки ЭС-1Т.

Штатно установленный микрометр позволил контролировать расстояния между обкладками рабочего конденсатора и высоту исследуемого полимера,

размещенного в конденсаторе C_x при определении диэлектрической проницаемости (рисунок 22).

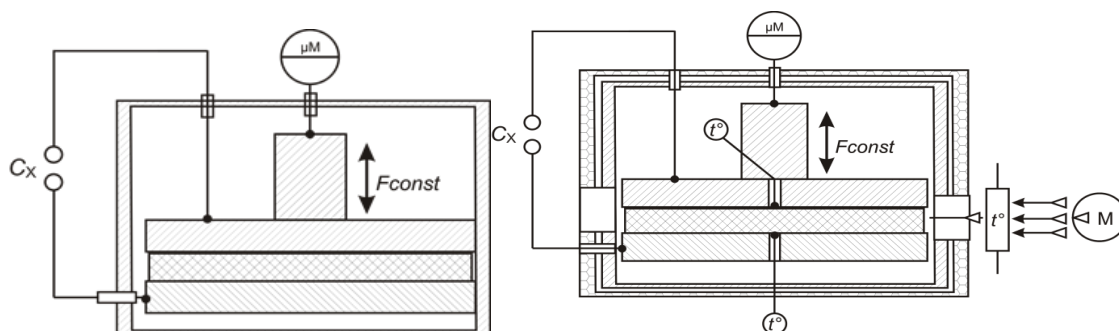


Рисунок 22 – Принципиальная схема ячейки ЭС-1Т измерения диэлектрических свойств полимерных материалов до и после модификации

Динамика насыщения образцов влагой контролировалось весовым методом при помощи аналитических весов с точностью измерения 0,0001 г.

При определении диэлектрической проницаемости ε' (9) используется аналогичная схема измерений.

$$\varepsilon(T) = \frac{C_{хп}}{C_{хв}} = \frac{C_1 - C_2(T)}{C_1 - C_{2в}(T)}, \quad (9)$$

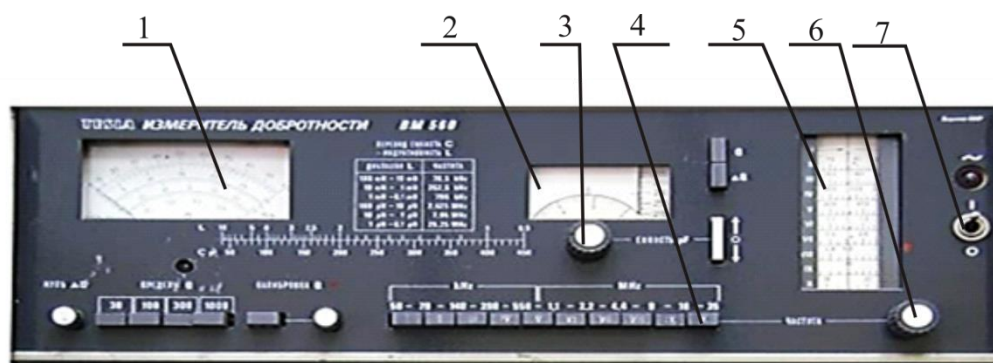
где $C_{хп}$ – емкость конденсатора измерительной ячейки с размещенным в ней испытуемым полимером;

$C_{хв}$ – емкость конденсатора измерительной ячейки с воздушным зазором, равным толщине исследуемого полимерного материала;

$C_{2в}$ – емкость настроечного конденсатора при подключенной измерительной ячейке с воздушным зазором, равным толщине полимерного образца, и контуре, настроенном в резонанс.

Использование коаксиального кабеля с его незначительной протяженности (100 мм) для соединения измерительной ячейки с генератором (ВМ-560) несколько затруднило расположение ячейки, однако такое решение позволило уменьшить паразитные емкости проводов и игнорировать их пренебрежимо малое влияние при процессе измерения и расчета величины диэлектрической проницаемости ε' .

Описанная методика реализуется с использованием измерителя добротности ВМ-560 (рисунок 23).



1 – откалиброванная шкала вольтметра на показания добротности, 2 – шкала показания емкости настроенного конденсатора C_1 , 3 – ручка изменения емкости C_1 , 4 – переключатели диапазона выбираемых частот генератора, 5 – шкала выбранной частоты, 6 – ручка настройки выбираемой частоты, 7 – тумблер включения прибора

Рисунок 23 – Измеритель добротности ВМ-560

В соответствии с инструкцией прибора ВМ-560 измерения и контроль производятся в ручном режиме и содержат трудоемкий процесс настройки контура в резонанс. Для автоматизации процесса сбора, хранения, обработки и анализа информации с целью получения новых знаний о полимерах был разработан автоматизированный модуль системы научных исследований электрофизических параметров (АСНИ ЭФП). Структурная схема модуля представлена на рисунке 24.

В качестве метода нагрева был выбран конвективный нагрев, теплоносителем был разогретый техническим феном модели БПВ – 2000 Вт воздух. Управление силовым нагревательным устройством осуществлялось с использованием ПИД-регулятора.

Разработка алгоритма работы модуля по определению электрофизических параметров (ЭФП) полимеров было осуществлено согласно существующей методике проведения экспериментов по их определению [45]. Алгоритм работы модуля АСНИ ЭФП представлен на (рисунок 25).

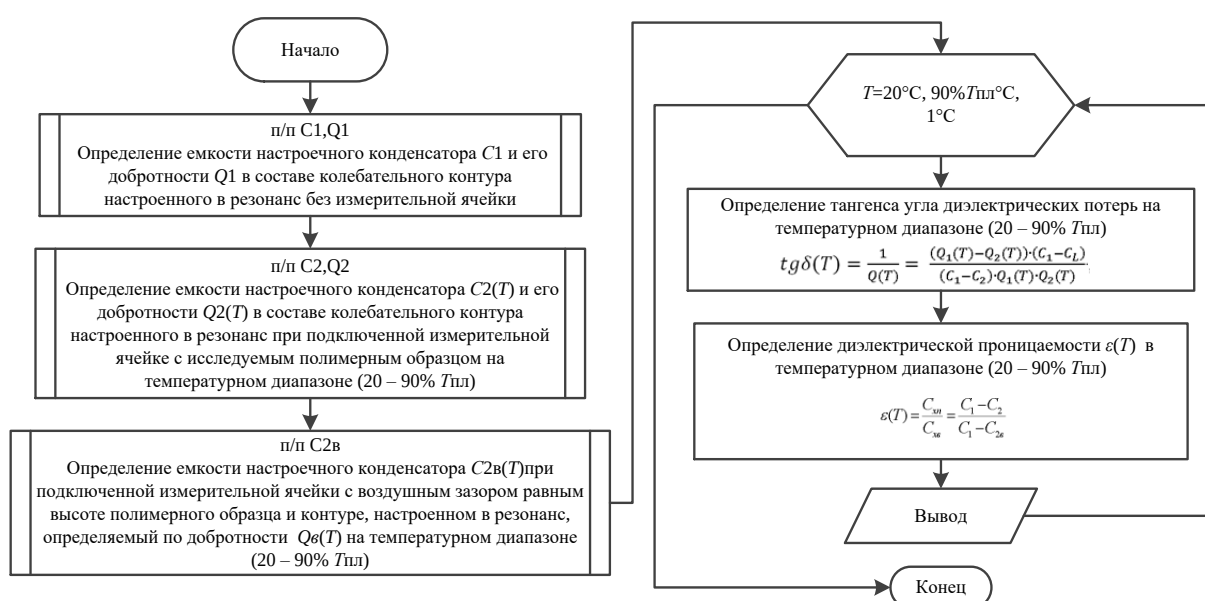


Рисунок 25 – Алгоритм работы модуля автоматизированной системы научных исследований электрофизических параметров полимерных материалов

С целью облегчения процесса отладки программ по получению данных в ходе эксперимента по определению ЭФП, алгоритм предусматривает его разделение на несколько подпрограмм, представленных на рисунках: 26; 27; 28.

Хотелось бы остановиться более подробно на принципах работы указанных ниже алгоритмов.

Необходимо отметить, что всем работам предшествует обязательная процедура нагрева прибора и его калибровка. Описание процедур опущено, т.к. оно подробно дается в паспорте на измеритель добротности ВМ-560 (рисунок 23). Алгоритм п/п C_1 , Q_1 (рисунок 26) описывает порядок определения диэлек-

трических свойств и их значений для емкости настроечного конденсатора C_1 и его добротности Q_1 . Данные измерения проводятся всякий раз перед началом каждой серии экспериментов, при этом измерительная ячейка из схемы исключается. Перед включением прибора тумблером 7 (рисунок 23) выполняются подготовительные работы по определению искомым параметров, а именно переключателем 4 выставляется диапазон рабочих частот, устанавливается рабочая частота, поворотом ручки настройки 6 (рисунок 23), определяемой по шкале 5 (рисунок 23) прибора ВМ-560 (в нашем случае 27,12 МГц). В верхней части прибора в специальные разъемы устанавливается образцовая индуктивность L (выбранной частоте 27,12 МГц соответствует катушка № 12 $L=0,55$ МГн, $C_L=3,5$ пФ). Экспериментальное определение диапазона начальной C_n и конечной емкости C_k подстроечного конденсатора C_i , контролируется по шкале 2 (рисунок 23) и осуществлялось ручным перебором штатно установленного регулятора прибора 3 (в нашем случае $C_n=20$ пФ, $C_k=60$ пФ).

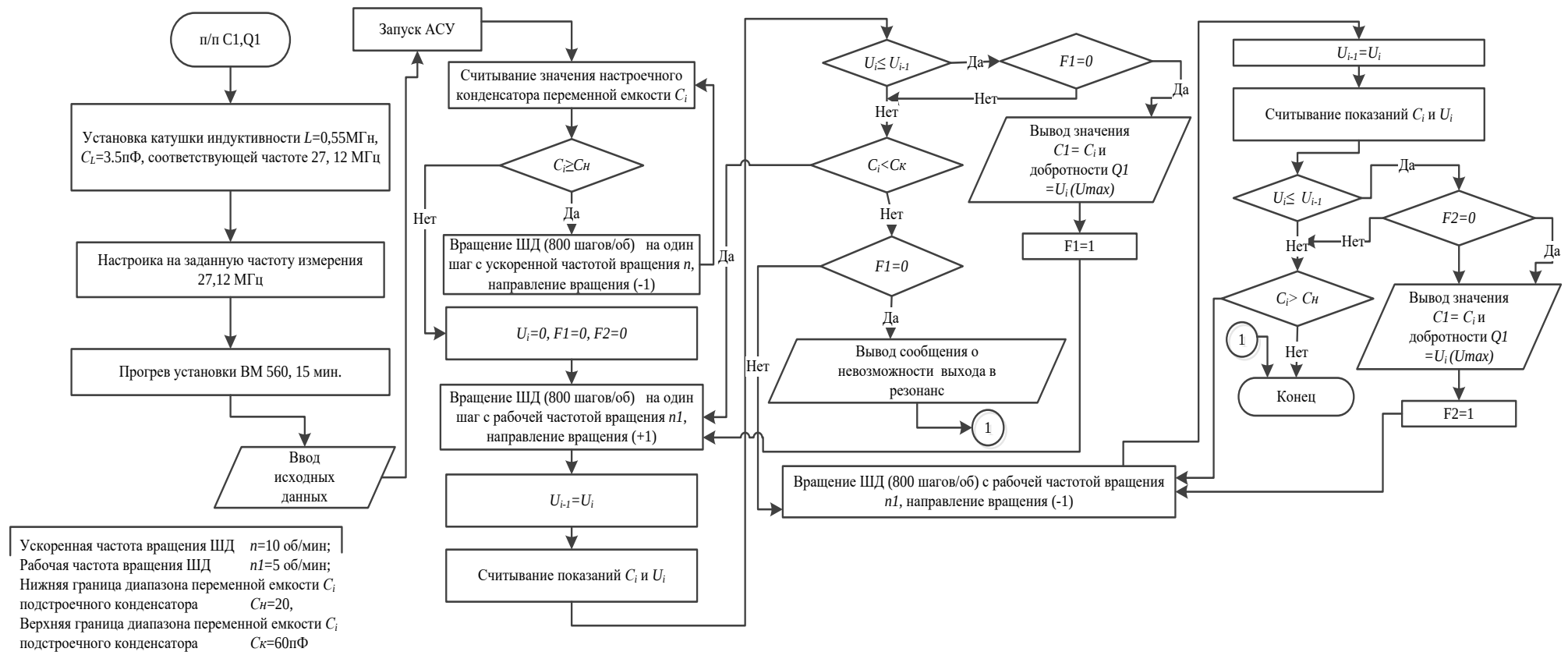


Рисунок 26 – Алгоритм п/п C_1, Q_1 определения емкости настроенного конденсатора C_1 и его добротности Q_1 в составе колебательного контура, настроенного в резонанс без измерительной ячейки

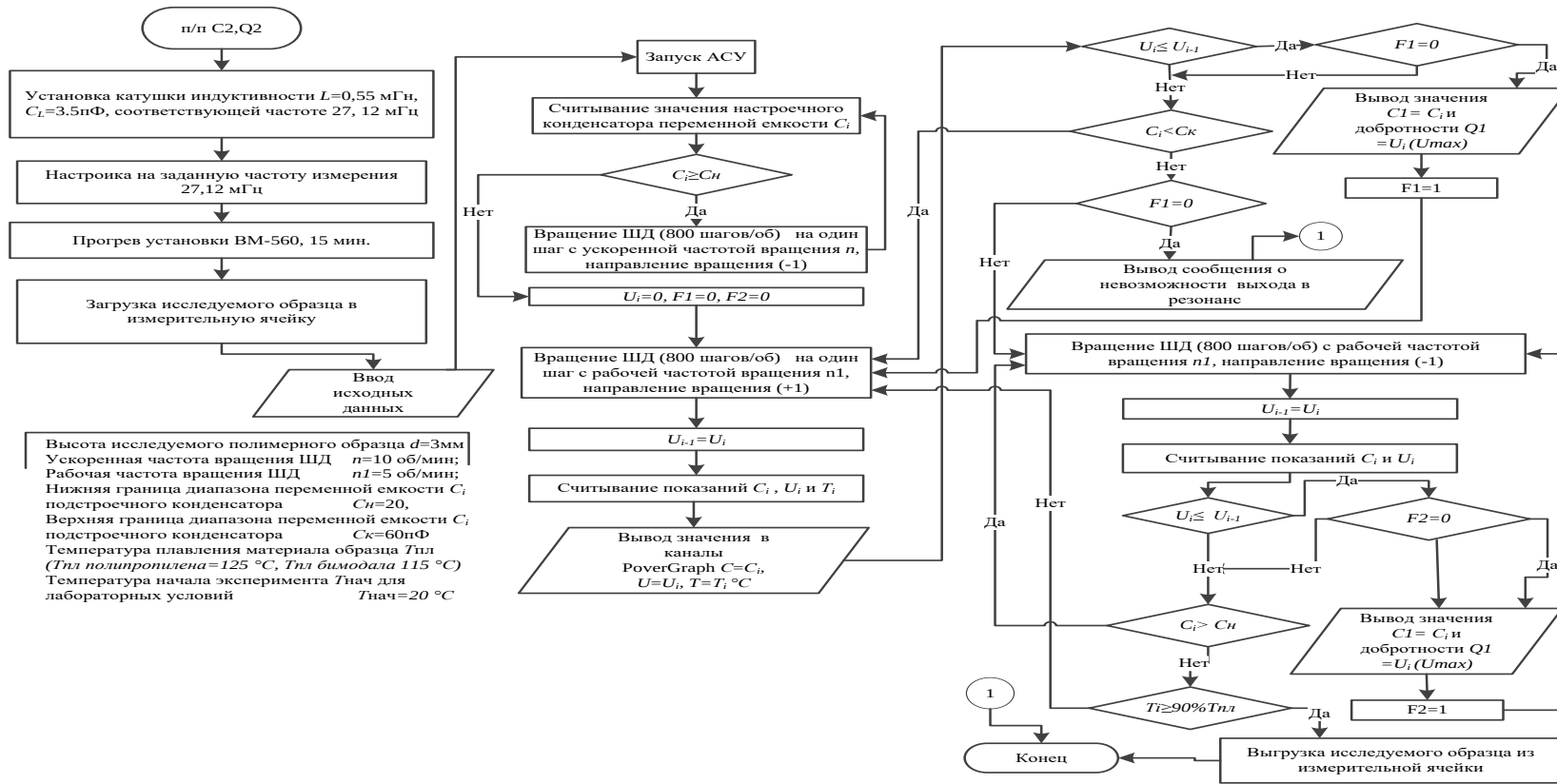


Рисунок 27 – Алгоритм п/п C_2 , Q_2 определения емкости настроенного конденсатора $C_2(T)$ и его добротности $Q_2(T)$ в составе колебательного контура, настроенного в резонанс при подключенной измерительной ячейке с исследуемым полимерным образцом на температурном диапазоне (20 – 90% $T_{пл}$)

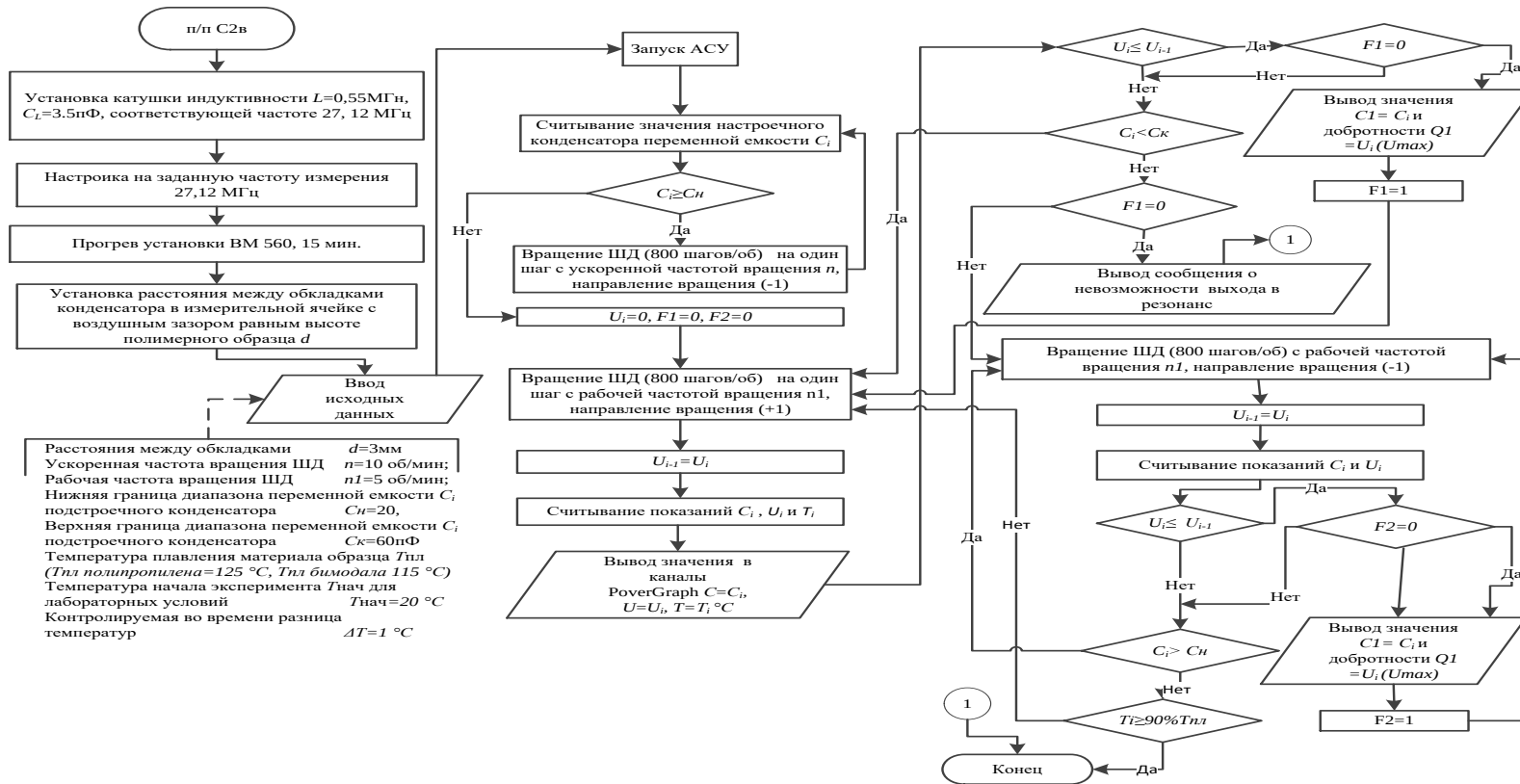


Рисунок 28 – Алгоритм п/п $C_{2в}$, определения емкости настроенного конденсатора $C_{2в}(T)$ при подключенной измерительной ячейке с воздушным зазором, равным высоте полимерного образца и контуре, настроенном в резонанс, определяемый по добротности $Qв(T)$ на температурном диапазоне (20 – 90% $T_{пл}$)

Хотелось бы отметить, что ручные операции, выполняемые в процессе исследований, показали, что настройка подстроечного конденсатора C_i и контроль значений по аналоговым приборам объективно снижает точность выхода в резонанс колебательного контура. Показания добротности Q определяются по откалиброванной шкале вольтметра 1 (рисунок 23) [107].

Дополнительно необходимо отметить, что в соответствии с паспортными данными ВМ-560 [45] основная погрешность измерения добротности при исследовании термопластических полимеров в пределах измеряемой добротности 100-300 не превышает $\pm 6\%$ от измеряемого значения. Дополнительные погрешности измерения добротности вносят отклонение от опорной температуры измерения ($1/2$ основной погрешности на каждые 10°C изменения температуры) – $\pm 1...2\%$ и погрешность градуировки измерительного конденсатора по емкости $\pm 1\%$. Итоговая погрешность составляет $\pm 8...9\%$. Погрешность измерения напряжения на измеряемом объекте от конечного значения рабочей части шкалы прибора составляет величину не более $\pm 15\%$. Уменьшение таких погрешностей измерения непростая задача.

Уменьшение погрешности измерения за счет автоматизации процесса измерения, исключения субъективной составляющей погрешности обеспечивает разработанная авторами АСНИ ЭФП. Тем не менее было установлено, что замена ручного вращения механизацией (установкой шагового двигателя) позволяет уверенно фиксировать значения добротности Q по максимальному показанию отградуированного вольтметра в случае тщательной подборки рабочей скорости вращения. Данная скорость была экспериментально определена по показателю задаваемых оборотов шагового двигателя ($n_1=5$ об/мин). Скорость ускоренного хода, при установке емкости к ее начальному значению, была определена опытным путем и составила $n=10$ об/мин.

После ввода данных автоматизированная система научных исследований позволяет непрерывно считывать значения емкости C_i с одновременным контролем значения добротности Q_i по напряжению U_i . Вращение выбранного ШД

(800 шагов/об) осуществлялось с цикличностью один шаг при выбранной рабочей частоте вращения $n_1=5$ об/мин.

Емкость конденсатора C_i вычислялась как функция угла поворота датчика, в качестве которого использовался многооборотный переменный резистор, позволяющий плавно менять свое значение с 0 Ом до 10 кОм за 10 полных оборотов. Таким образом, несложно определить, что для 10 разрядного АЦП одна логическая единица, при опорном напряжении в 5 В даст точность измерения напряжения $U_i=0,0049$ В.

После нахождения максимального значения напряжения при выходе системы в резонанс, когда $U_i=U_{\max}$ АСНИ выводит значения текущей емкости C_1 , и добротности $Q_1= U_{\max}$ (градуировка вольтметра ВМ-560) на персональный компьютер для проведения их обработки, анализа и получения новых научных данных.

Таким образом, определялись показатели электрофизических свойств, штатно установленных радиокомпонентов, входящих в состав колебательного контура установки по измерению добротности (ВМ-560). Полученные значения в дальнейшем использовались как исходные данные для следующих исследований. Измерения производились в нормальных условиях, при отключенных силовых приборах с целью снижения влияния помех.

Отличительными особенностями алгоритма п/п C_2 , Q_2 является то, что процесс нахождения исходных данных для определения тангенса угла диэлектрических потерь исследуемого полимерного материала осуществлялся при изменении нагрева образцов полимерного материала от нормальной температуры $T_{\text{нач}}=20$ °С до наиболее эффективной температуры сушки, определенной авторами [24], как $T_{\text{сушк}}=90\%T_{\text{пл}}$. Скорость нагрева на всем диапазоне рабочих температур контролировалась в пределах 2 °С /мин [22, 24]. Алгоритм нагрева исследуемых образцов реализован ранее коллективом нашей школы «Высокочастотная электротермия» ИрГУПС [22, 58] и в рамках данной работы не описывается.

Исследования показали, что декларируемые паспортные данные по температурам плавления $T_{пл}$ полимерных материалов, поставляемых на рынок, зачастую отличаются от фактических. С целью определения действительных температур плавления исследуемых материалов были организованы и проведены уточняющие эксперименты. В качестве образцов были выбраны полимерные материалы, входящие в рабочую смесь выпускаемого упаковочного полотна. Исследования проводились с использованием метода Фишера-Джонса [70]. В нагревательной печи, повышая температуру с постоянной скоростью для предотвращения тепловой инерции нагревали гранулированные образцы полимерного материала. Наблюдение за изменением состояния вещества для большей достоверности осуществляли с использованием покрывного стекла. Отмечали температуру, при которой начинается плавление (образец переходит в вязко-текучую (жидкую) фазу). С целью повышения объективности определения температур рядом с образцом размещали датчик температур (термопару), цифровые показания которого выводили на экран монитора. Температура расплава идентифицировалась в момент стабилизации температуры нагрева («полка» на графических данных) рисунка 29.

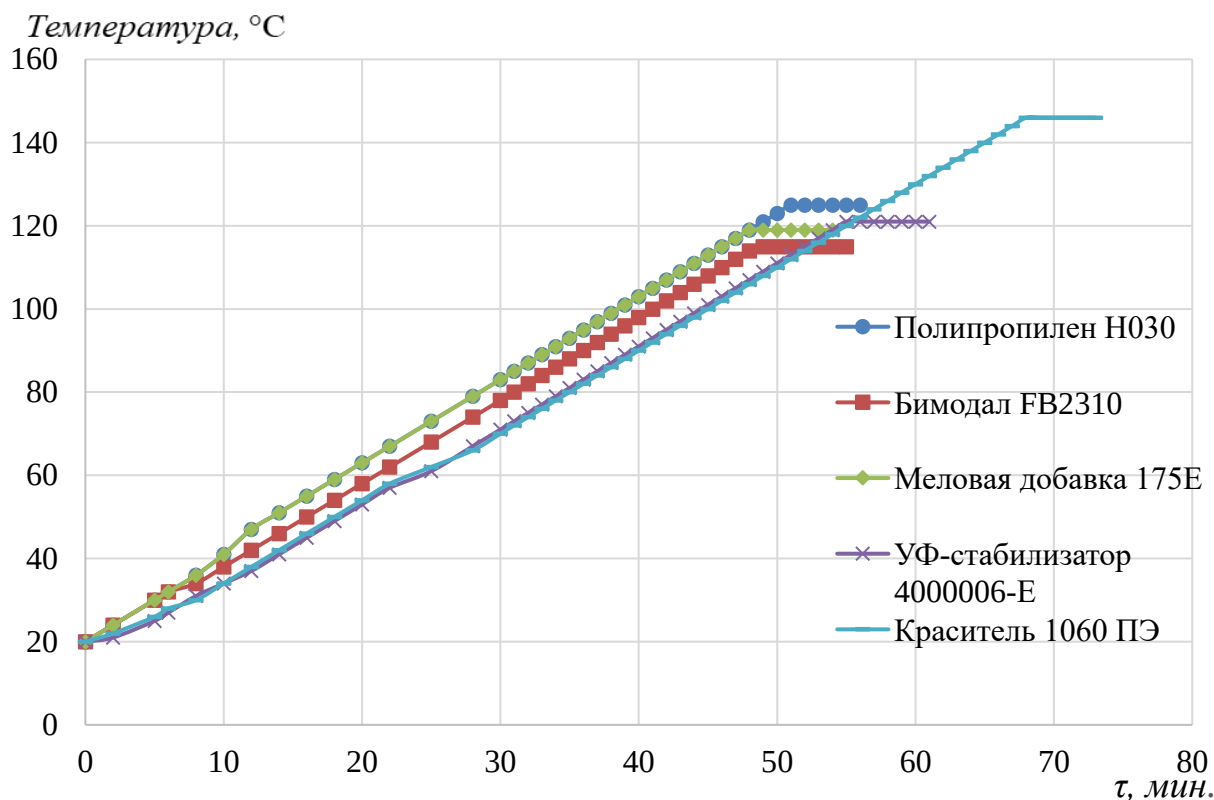


Рисунок 29 – Данные по определению температур плавления полимерных материалов

Анализ полученных данных позволил определить температуру плавления и ее отличие от паспортных данных. Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Температура плавления полимеров и ее отличие от паспортных данных

Марка полимерного материала	Температура плавления (паспортные данные), $T_{пл. п}$ °C	Температура плавления (экспериментальные данные), $T_{пл. э}$ °C	Несоответствия, %
Полипропилен ПП Н030	155	125	19,4
Бимодал FB 2310	127	115	9,5
Меловая добавка 175Е	110	119	7,6
УФ-стабилизатор 400006-Е	130	121	7
Краситель 1060 ПЭ	150	146	2,7

Скорость изменения температуры образца соответствовала требованиям ГОСТ [79, 94] и не превышала $V_{нагрева} \leq 2$ °C/мин [23, 24]. Необходимо отме-

тить, что решение данной задачи по ограничению скорости нагрева была ранее решена научной школой ВЧ-электротермии ИрГУПС и решение, представленное в [22], использовано в настоящей работе.

Нахождение C_2 , Q_2 производилось при подключенной измерительной ячейке с размещенным между обкладками ее конденсатора акклиматизированным и увлажненным исследуемым образцом полимерного материала. Размер образцов определялся диаметром электродов измерительной ячейки и составлял $\varnothing 50$ мм. С учетом допуска размер не превышал номинальный размер электрода. Высота образца составляла $h=1,2$ мм.

В качестве образцов использовались базовые при производстве пленочных упаковочных материалов полипропилен ПП Н030 и бимодал FB 2310. Совокупность данных полимеров составляют в смесях не менее 85%.

Процедура проведения эксперимента основывается на алгоритме нахождения «п/п C_1 , Q_1 », описанного выше, включая загрузку увлажненного полимера, автоматизированный контроль температуры, многократный прогон эксперимента с целью определения динамики C_2 , Q_2 в зависимости от температуры T_i , в пределах $T_{нач} < T_i \leq T_{сушк}$ и выгрузку исследуемого полимера.

Необходимо отметить, что алгоритм предусматривает обратный прогон $T_{нач} \geq T_i > T_{сушк}$, после отключения нагревателя с целью определения показателей C_2 , Q_2 для исследуемого полимера в уже высушенном его состоянии.

Разработка алгоритма «п/п $C_{2в}$ », была продиктована необходимостью нахождения показателя диэлектрической проницаемости (9). Данный алгоритм является частным случаем алгоритма «п/п C_2 , Q_2 » без размещения полимерного образца в измерительной ячейке.

Дополнительно отметим, что прием, обработка, хранение и анализ информации с получением новых знаний производились с использованием ПО PowerGraph.

Для контроля влажности исследуемых образцов и управления процессом увлажнения использован автоматизированный метод термогравиметрии. Разра-

ботанная установка гравиметрии, реализующая требования ГОСТ 29244-91 [37], представлена на рисунке 30.

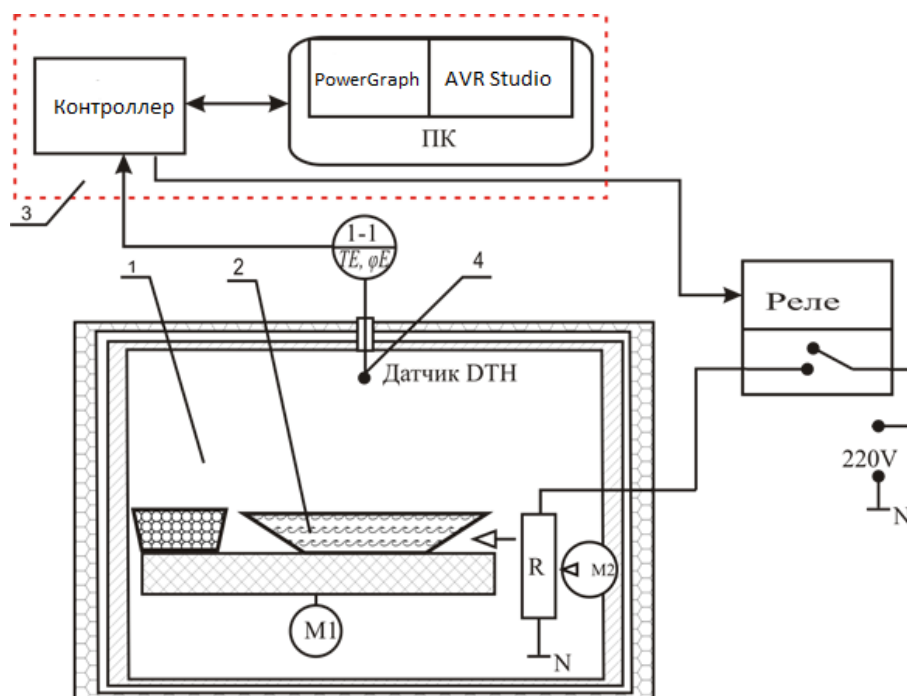


Рисунок 30 – Схема камеры увлажнения и кондиционирования образцов полимерных материалов

Установка состоит из собственно камеры увлажнения 1 с размещенной в ней емкостью 2 с раствором насыщенных солей для обеспечения влажности. Автоматизированная системы регистрации 3 относительной влажности и поддержания заданной температуры в рабочей камере позволяет создавать и идентифицировать стабильные условия формирования состояния влажности образца. Концентрация и химический состав солей обеспечивающих необходимую влажность представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Относительная влажность воздуха над насыщенными водными растворами солей известной аналитической марки

Насыщенные водные растворы солей	Относительная влажность, φ %, при температуре, T °C									
	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60
Гидроксид калия (KOH)	14	13	10	9	8	7	6	6	6	-
Хлорид лития ($\text{LiCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$)	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11
Ацетат калия (CH_3COOK)	25	24	24	23	22	22	21	20	-	-
Хлорид магния ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	34	34	34	33	33	33	32	32	31	30
Карбонат калия ($\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	46	45	44	44	43	42	41	40	38	36
Нитрат магния $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	58	57	56	5	53	51	50	48	46	43

Продолжение таблицы 6

Насыщенные водные растворы солей	Относительная влажность, φ %, при температуре, T °C									
	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60
Бихромат натрия ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	59	58	56	55	54	52	51	50	47	-
Нитрат аммония (NH_4NO_3)	-	73	69	65	62	59	55	53	47	42
Нитрит натрия (NaNO_2)	-	-	-	66	64	63	62	61	60	58
Хлорид натрия (NaCl)	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
Сульфат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	82	82	81	81	80	80	80	79	79	-
Хлорид калия (KCl)	88	87	86	86	85	84	84	83	81	80
Нитрат калия (KNO_3)	97	96	95	94	93	91	89	88	85	82
Сульфат калия (K_2SO_4)	98	98	97	97	97	96	96	96	96	96

Разработанная блок-схема последовательности выполнения работ для формирования состояния влажности образцов полимерных материалов показана на рисунке 31.



Рисунок 31 – Блок-схема последовательности выполнения работ для формирования состояния влажности образцов полимерных материалов

Оригинальность метода состоит в том, что замена в камере увлажнения и сушки растворов насыщенных солей позволяет производить как сушку, например, используя гидроксид калия, поддерживающего 9–12% относительной влажности, так и увлажнение до 97–98% при помещении образцов в камеру с насыщенным раствором сульфата калия. Контроль влажности производился online комбинированным датчиком температуры T °C и относительной влажности φ модели DHT 11 [42,78]. Контроль и регулирование температуры в рабочей камере осуществлялись при помощи системы автоматического регулирования 3. Разогрев среды камеры производился конвекционным методом с использованием нагревателя R , вентилятора M_2 и дефлектора M_1 , обеспечивающего равномерные прогрев и насыщение образцов [41]. Данные по содержанию влаги в рабочей камере и ее температуре передавались на контроллер [17, 77, 93, 99]. Обработанные данные по каналу COM протокола ASCII передавались на ПК. Установленное программное обеспечение PowerGraph дает возможность не только регистрировать информацию, но и математически ее обрабатывать, формировать новую информацию о технологических процессах.

Все это позволяет классифицировать разработанную автоматизированную установку гравиметрии как отдельный модуль автоматизированной системы научных исследований процессов обработки полимеров (АСНИ) [17].

Результаты экспериментальных исследований по насыщению полимерных материалов влагой представлены на рисунке 32, 33. Идентификацией окончания процесса увлажнения являлась стабилизация массы увлажненного полимера. Взвешивание производилось каждые 20 минут.

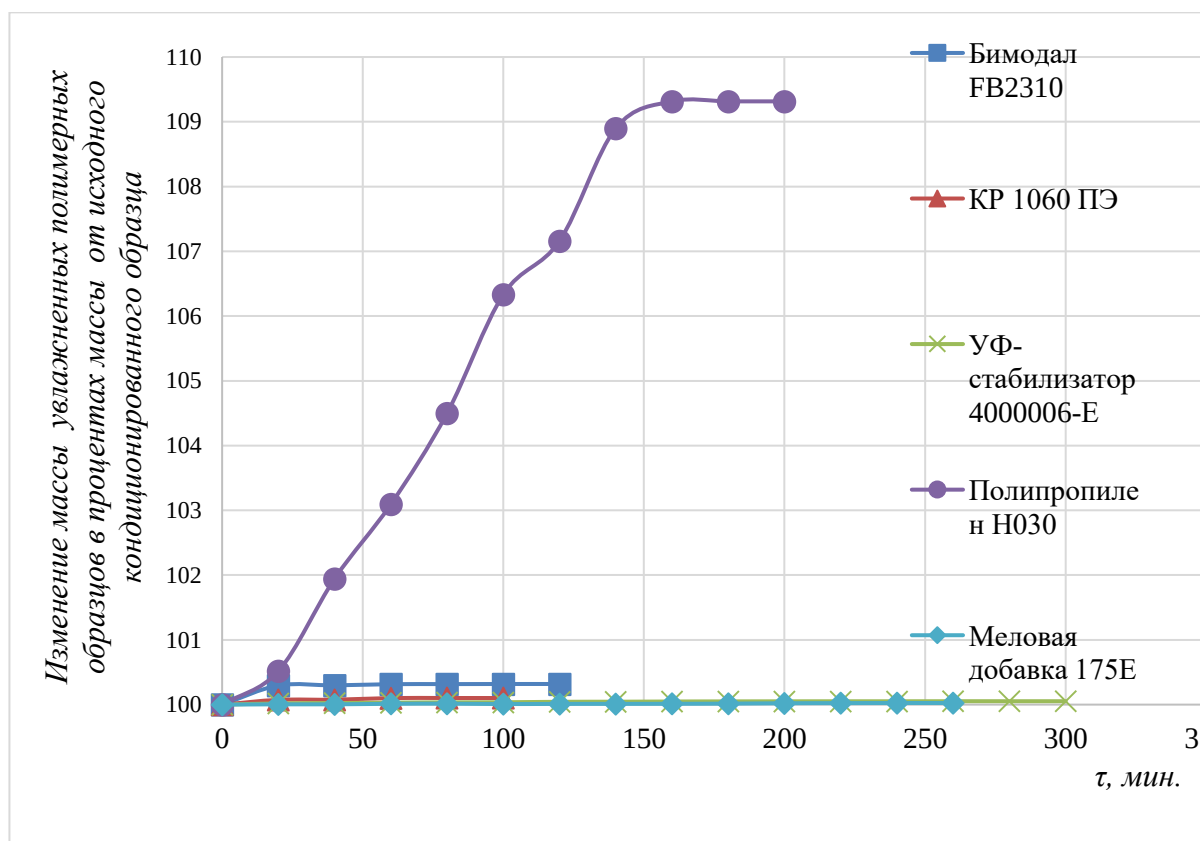


Рисунок 32 – Масса увлажненного полимерного образца в процентах от массы исходного кондиционированного образца

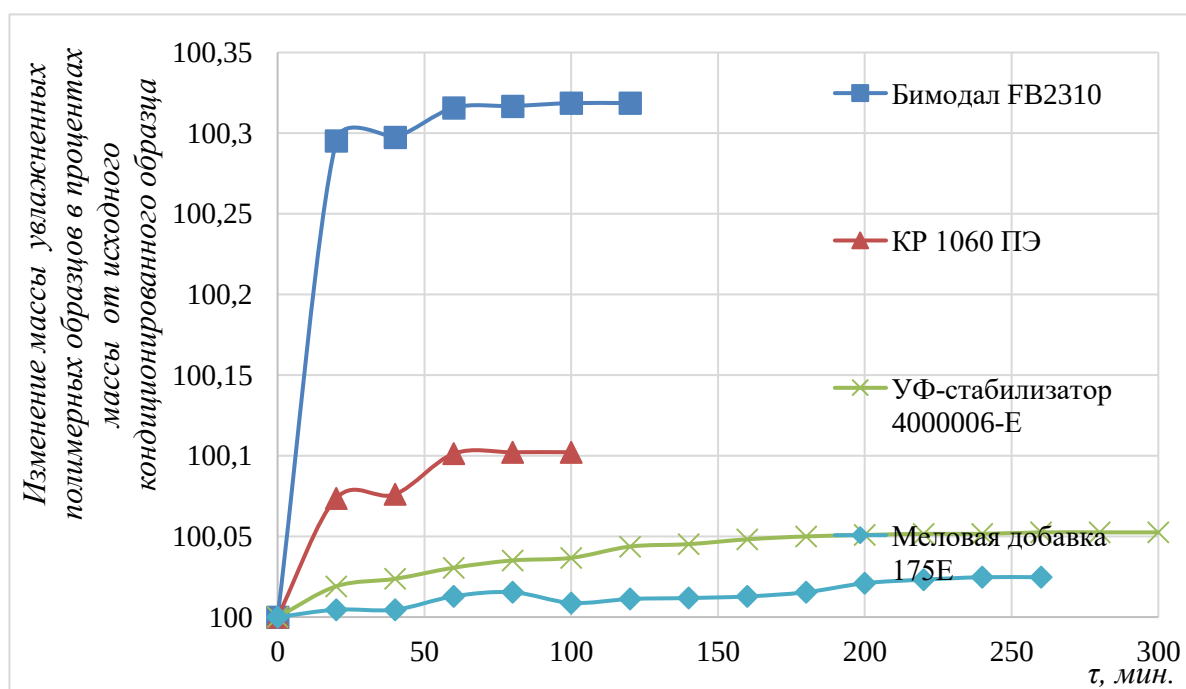


Рисунок 33 – Масса увлажненного полимерного образца в процентах от массы исходного кондиционированного образца

На рисунке 32 видно, что полипропилен марки Н 030 в десятке раз гигроскопичен нежели остальные полимеры, поэтому было принято решение построить еще одно семейство графиков (рисунок 33) без полипропилена для, того, чтобы сравнить результаты.

Получены значения максимальной относительной влажности каждого из материалов, входящих в состав полимерных смесей, что позволило получить новые данные о динамике полного увлажнения каждого из материалов.

Определено, что наиболее гигроскопичными материалами в смеси являются полипропилен марки Н 030 и бимодал марки FB 2310, что еще раз доказало правильность выбора данных полимеров в качестве материалов для более детального исследования их электрофизических свойств [32, 44].

2.4 Автоматизированный эксперимент по определению электрофизических показателей слабополярных и неполярных полимерных материалов

2.4.1 Методика автоматизированного определения электрофизических параметров

Проведение натурных испытаний по определению электрофизических свойств полимерных и композитных материалов проводилось в режиме автоматизированного эксперимента с использованием разработанной АСНИ ЭФП описанной выше.

Согласно алгоритму, показанному на рисунке 26 был проведен первый комплекс экспериментальных исследований для определения показателя добротности Q_1 и емкости конденсатора C_1 колебательного контура при частоте $f = 27,12$ МГц без установленной измерительной ячейки. После передачи данных в программный комплекс PowerGraph были получены предварительные данные, представленные на рисунке 34.

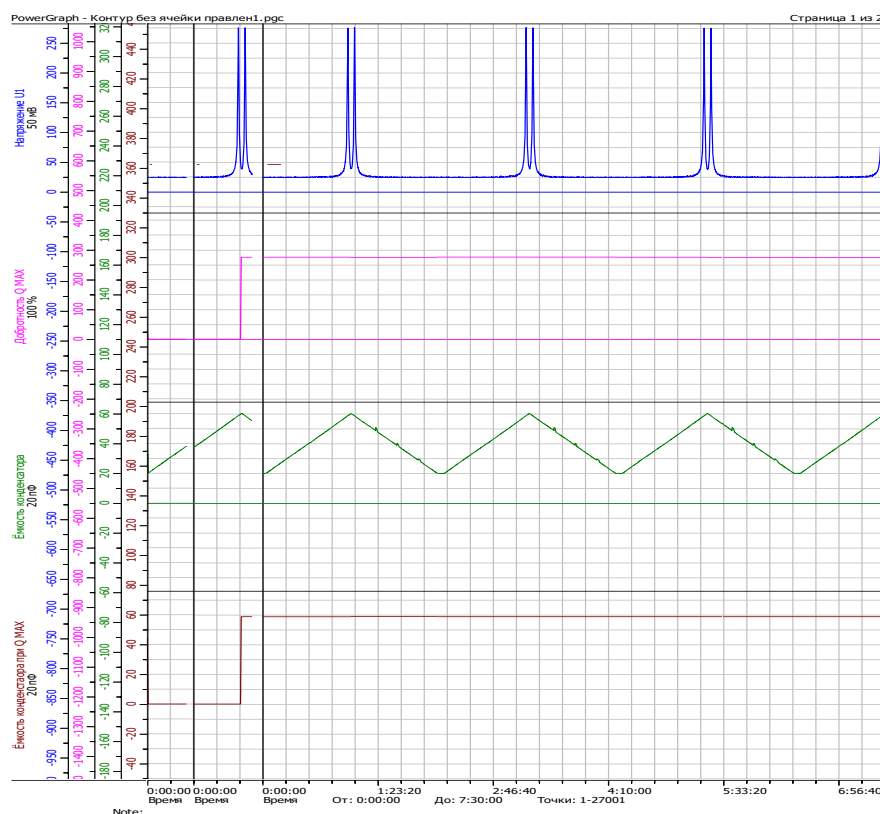


Рисунок 34 – Результаты экспериментальных исследований по определению показателя добротности Q_1 и емкости конденсатора C_1 колебательного контура при частоте $f = 27,12$ МГц без установленной измерительной ячейки

После фильтрации данных и проведенных расчетов были получены следующие показатели C_1 – емкости настроенного конденсатора в схеме колебательного контура без установки измерительной ячейки с полимером настроенного в резонанс и добротности конденсатора Q_1 , которые являются исходными данными для дальнейшего расчета электрофизических показателей ($\text{tg}\delta$, формула (8) и ε , формула (9)) исследуемого полимерного материала.

Из представленных данных можно видеть, что емкость настроенного конденсатора $C_1 = \text{const}$ и его добротность $Q_1 = \text{const}$ при прямом и обратном ходе измерения, что говорит об устоявшемся процессе (нагрева) работы прибора и отсутствии внешних воздействий. В нашем эксперименте C_1 и Q_1 приобретают следующие значения (10), (11)10:

$$C_1 = 58,7 \text{ пФ}, \quad (10)$$

$$Q_1 = 274,9\%. \quad (11)$$

Следующий этап экспериментов проводился с целью определения показателя добротности Q_2 и емкости конденсатора C_2 колебательного контура при частоте $f = 27,12$ МГц с установленной измерительной ячейкой и размещенным в ней исследуемым образцом в соответствии с алгоритмом на рисунке 27.

Таким образом, проведена предварительная настройка измерительного контура, определены его параметры без образца и с установленной измерительной ячейкой, а также сформированы условия подготовки полимерных материалов для последующего исследования влияния влагосодержания и температуры на их электрофизические параметры.

В качестве исследуемых использовались образцы двух неполярных материалов: полипропилена марки Н030 и бимодала марки FB 2310.

При проведении экспериментов использовались материалы в четырех состояниях:

1. Образцы кондиционированные (высушенные), доведенные до состояния преимущественно свободного от влаги, (метод D, ГОСТ 56762-2015 [39]).
2. Образцы кондиционированные в условиях влажности, отличных от условий окружающей среды, (метод E (BHVP + BHEP)), ГОСТ 56762-2015 [39]). Кондиционирование полимерных образцов производилось при относительной влажности окружающей среды 95% (обеспечивается использованием насыщенного раствора соли KCl, ГОСТ 29244-91 [37]) и нормальной температуре на каждом этапе.
3. Образцы кондиционированные внутри емкости для погружения в воду при условиях, отличных от условий окружающей среды, при нормальной температуре до получения равновесного состояния влажности: производят периодическое взвешивание образца. (метод BWEP, ГОСТ 56762-2015).
4. Образцы кондиционированные внутри емкости для погружения в воду при условиях, отличных от условий окружающей среды, при нормальной температуре и использовании дистиллированной воды (ГОСТ 58144-2018 [40]) до получения равновесного состояния влажности: производилось периодическое взвешивание образца (метод BWEP, ГОСТ 56762-2015).

Каждое состояние соответствует определенным условиям эксплуатации полимерных материалов. Первое соответствует эталонному состоянию полимера, к которому необходимо стремиться при реализации технологии производства упаковочных материалов. Второе состояние соответствует условиям транспортировки в условиях повышенной влажности при соблюдении целостности упаковки. Третье состояние соответствует условиям хранения материалов в загрязненных складских помещениях. Четвертое состояние соответствует условиям транспортировки и хранения материалов при прямом воздействии на них атмосферных осадков.

Отдельный результат полученных в PowerGraph данных для расчета электрофизических параметров полимерного материала марки бимодал FB 2310 представлены на рисунке 35, остальные результаты не показаны.

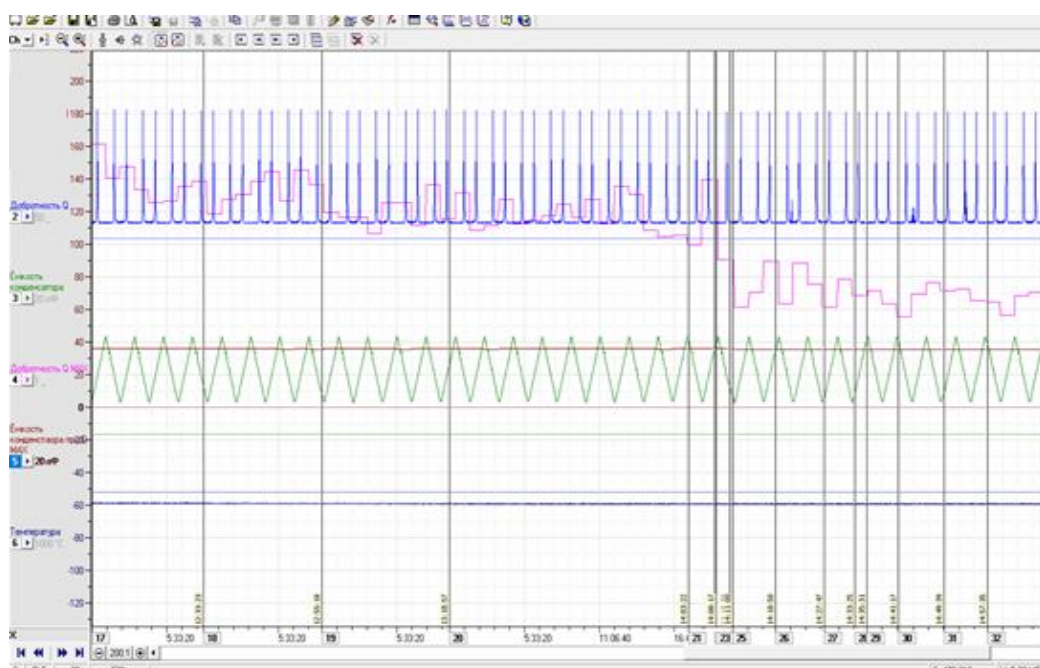
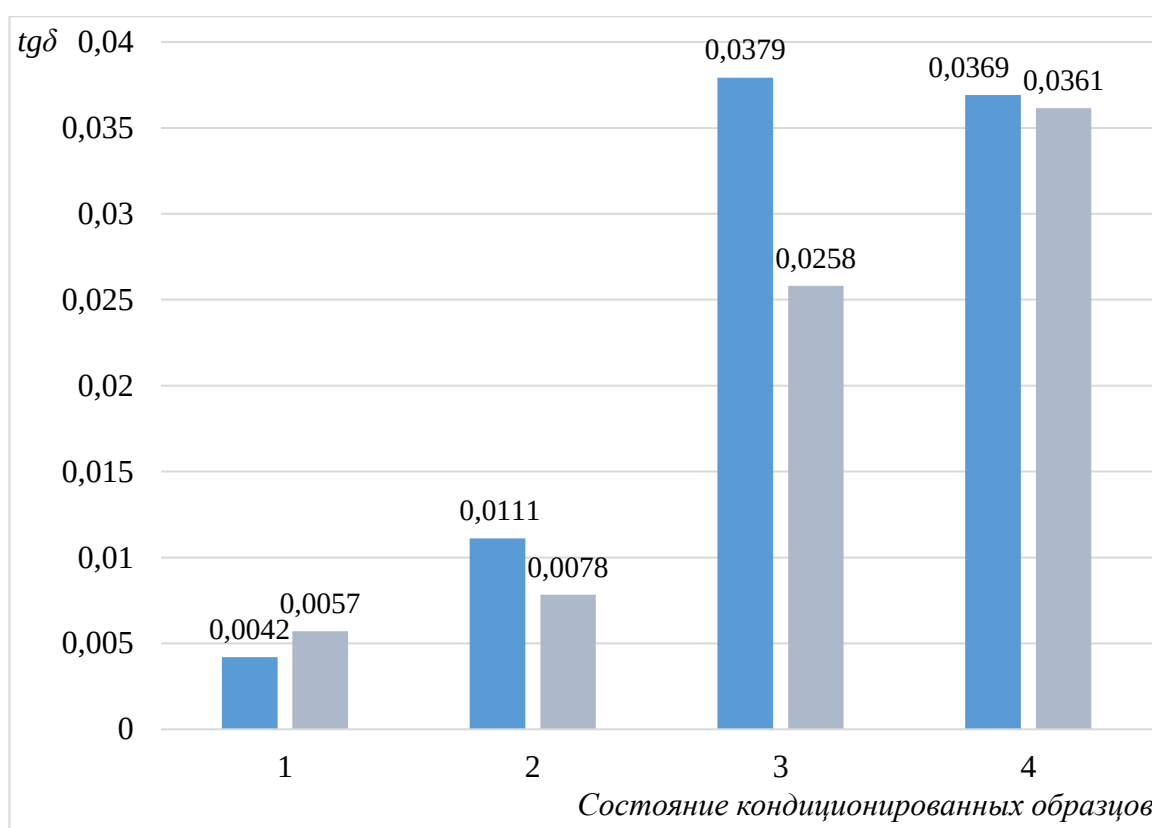


Рисунок 35 – Результаты экспериментальных исследований по определению показателя добротности Q_2 и емкости конденсатора C_2 колебательного контура при частоте $f = 27,12$ МГц (нормальные условия) с установленной измерительной ячейкой и размещенным в ней исследуемым кондиционированным (высушенным), доведенным до состояния преимущественно свободного от влаги бимодальным полиэтиленом марки FB 2310

2.4.2 Исследование влияния влагосодержания и температуры на электрофизические параметры полимеров

По полученным данным в соответствии с методикой, указанной выше были получены электрофизические параметры полимерных материалов.

На рисунке 36 показаны диаграммы влияния четырех состояний исследуемых полимерных материалов, описанных выше на электрофизические свойства полимеров.



1 – образцы кондиционированные (высушенные), 2 – образцы кондиционированные в условиях влажности, 3 – образцы кондиционированные внутри емкости для погружения в воду, 4 – образцы кондиционированные внутри емкости для погружения в дистиллированную воду

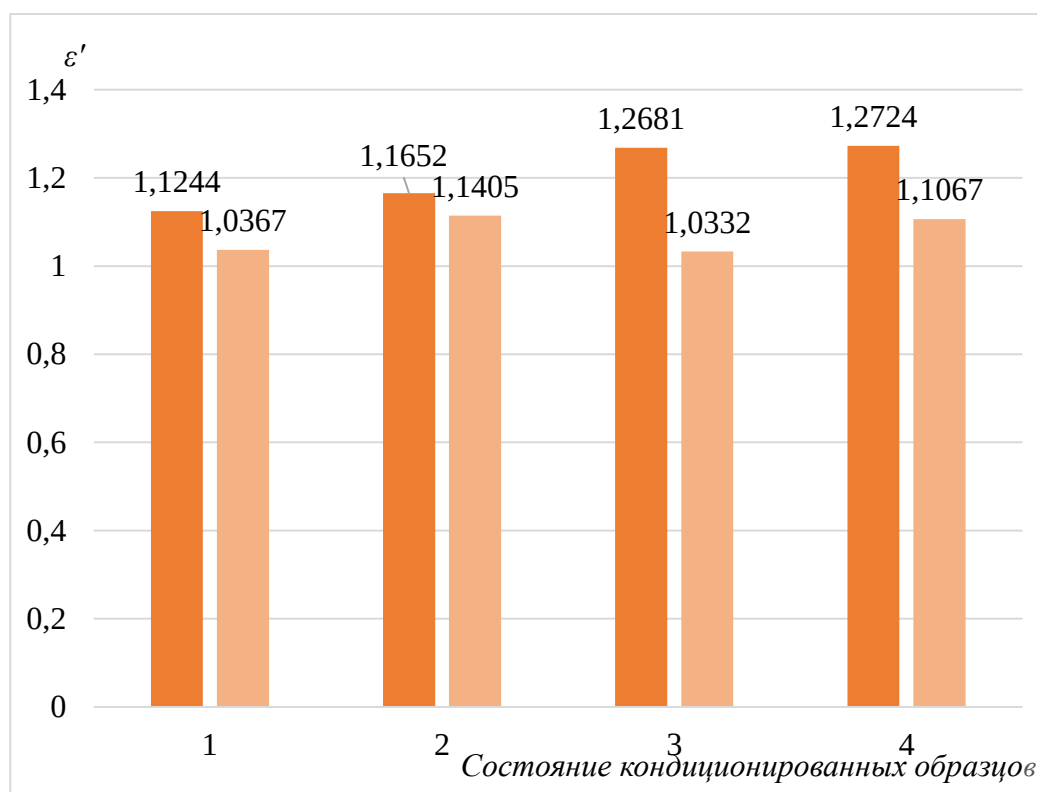
Рисунок 36 – Диаграмма изменения $tg\delta$ при нормальных условиях для бимодала FB2310 и полипропилена H030

Здесь можно отметить главное, что за счет влаги резко меняется $tg\delta$. Нахождение во влажной среде (состояние 2) приводит к значительному изме-

нению $tg\delta$ (по результатам измерения в три раза) и приближает исследованные полимерные материалы к полярным по нижней границе $tg\delta$, например, поликарбонату (таблица 4).

Непосредственный контакт с водой вводит исследуемые полимеры в группу полярных с увеличением значения $tg\delta$ более чем в 9 раз, что соответствует значению $tg\delta$ полиамида, поливинилхлорида и др. Более того, выявлен интересный факт неоднозначного воздействия воды с различной электропроводностью на показатель диэлектрических потерь.

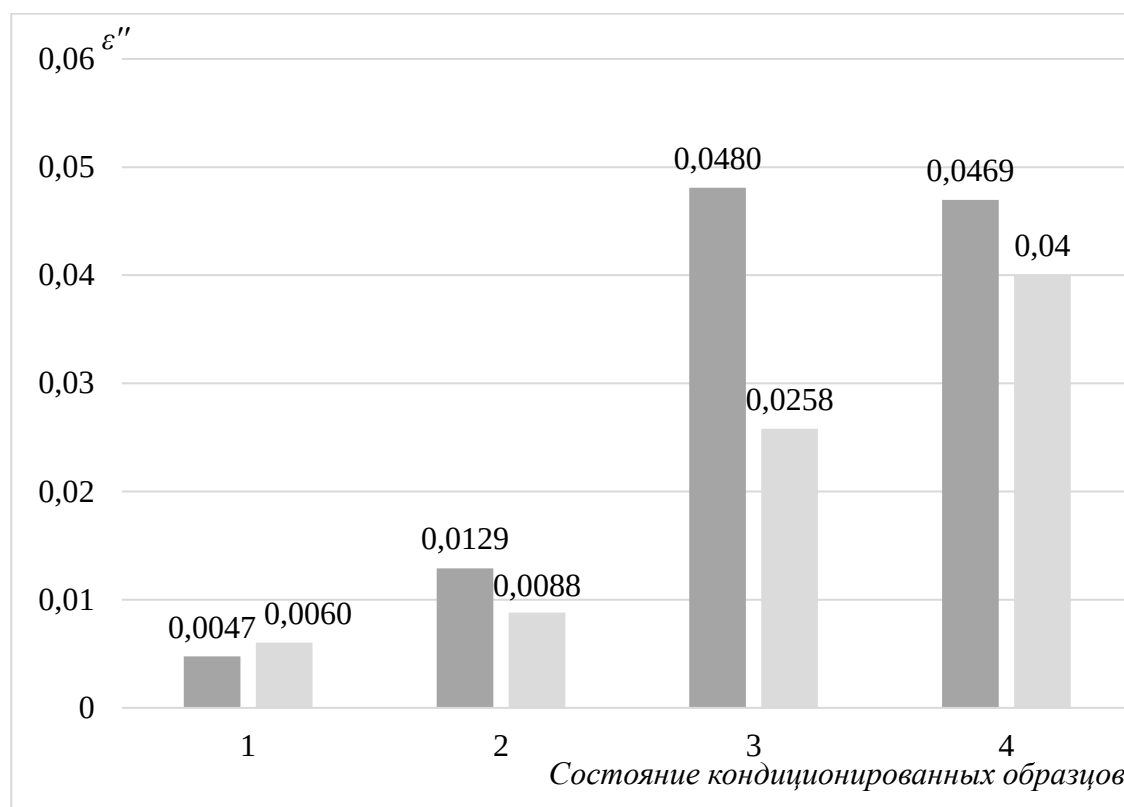
Влияние влаги на показатель диэлектрической проницаемости ϵ' исследовался также для четырех состояний вышеназванных полимерных материалов. Результаты исследований представлены на рисунке 37.



1 – образцы кондиционированные (высушенные), 2 – образцы кондиционированные в условиях влажности, 3 – образцы кондиционированные внутри емкости для погружения в воду, 4 – образцы кондиционированные внутри емкости для погружения в дистиллированную воду

Рисунок 37 – Диаграмма изменения ϵ' при нормальных условиях для бимодала FB2310 и полипропилена H030

На диаграммах изменения ε' показано, что влага оказывает влияние на ε' , увеличивая его значение для бимодала марки FB 2310 и полипропилена марки H030 на 3,5% и 9,2% соответственно. Можно сделать вывод о том, что в отличие от $\operatorname{tg}\delta$ диэлектрическая проницаемость ε' изменяется в меньшем диапазоне и самостоятельно практически не меняет степень полярности вышеуказанных полимеров, оказывая влияние на комплексный показатель ε'' , входящий в основное уравнение расчета мощности диэлектрического нагрева (). Результаты динамики ε'' представлены на рисунке 38.



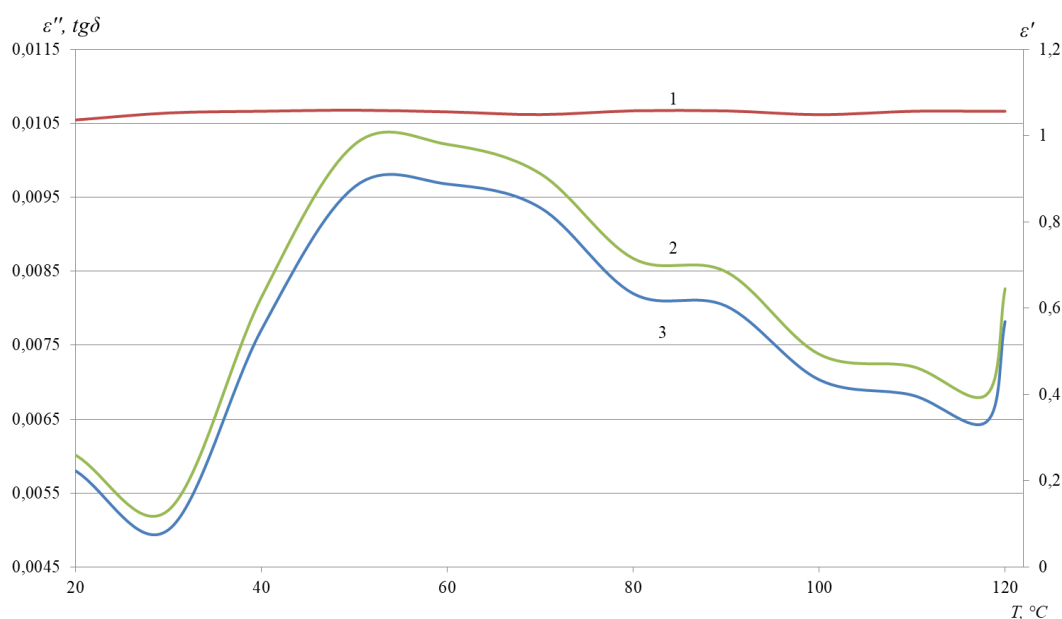
1 – образцы кондиционированные (высушенные), 2 – образцы кондиционированные в условиях влажности, 3 – образцы кондиционированные внутри емкости для погружения в воду, 4 – образцы кондиционированные внутри емкости для погружения в дистиллированную воду

Рисунок 38 – Диаграмма изменения ε'' при нормальных условиях для бимодала FB2310 и полипропилена H030

Таким образом, на динамику ε'' основное влияние оказывает $\operatorname{tg}\delta$. Здесь также можно отметить, что за счет влаги мощность диэлектрического нагрева увеличивается для бимодала FB 2310 в 2,7 раза при состоянии 2 и в 10 раз при

состоянии 3 и 4, для полипропилена Н030 в 1,5 раза при состоянии 2, в 4,3 раза для состояния 3 и в 6,6 раза для состояния 4.

Вышеприведенный анализ показывает влияние влаги на электрофизические свойства полимерных материалов. При этом необходимо понимать, что данные параметры изменяются и при изменении температуры нагрева полимеров [36, 107]. С целью исследования такого влияния температуры проведена серия экспериментов. Исследовались кондиционированные (высушенные) образцы полипропилена Н030 и бимодала FB 2310, доведенные до состояния преимущественно свободного от влаги. Нагрев производился конвекционным способом с использованием ранее описанной исследовательской установки (рисунок 24). Результаты температурных зависимостей $\varepsilon'(T)$, $\varepsilon''(T)$ и $\operatorname{tg}\delta(T)$ полипропилена марки Н030 и бимодала марки FB 2310 представлены на рисунках 39 и 40 соответственно.



1 — ε' (диэлектрическая проницаемость), 2 — ε'' (коэффициент диэлектрических потерь), 3 — $\operatorname{tg}\delta$ (тангенс угла диэлектрических потерь)

Рисунок 39 — Электрофизические показатели сухого полипропилена Н030 в зависимости от температуры

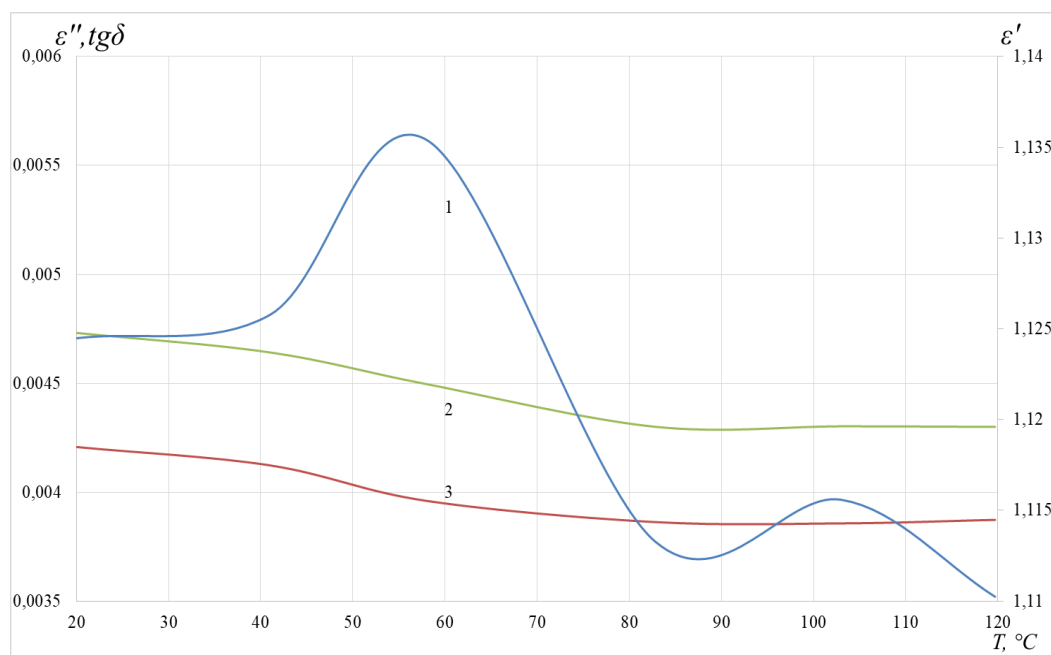
Анализ данных показывает, что при повышении температуры полипропилена Н 030 до 90 °C $\operatorname{tg}\delta$ увеличивается в 4 раза относительно его значения, полученного при температуре 20 °C. Свыше 90 °C наблюдается падение $\operatorname{tg}\delta$, но с

практической точки зрения данный диапазон нас не интересует, так как предполагаемая температура сушки составляет порядка 90 °С [22]. Таким образом нагрев слабополярных и неполярных полимеров приводит к значительному увеличению $tg\delta$, что в свою очередь приводит к повышению динамики их разогрева.

При повышении температуры изменение ε' составляет максимум 1,9%. Можно сделать вывод о том, что в отличие от $tg\delta$ диэлектрическая проницаемость ε' изменяется в меньшем диапазоне и самостоятельно практически не меняет степень полярности вышеуказанных полимеров, оказывая влияние на комплексный показатель ε'' , входящий в основное уравнение расчета мощности диэлектрического нагрева. Динамика коэффициента диэлектрических потерь ε'' схожа с динамикой изменения $tg\delta$ при нагреве полимерного материала и оказывая основное влияние на удельную мощность диэлектрического нагрева (), увеличивает ее в 1,8 раза по сравнению с мощностью, потребляемой при температуре полимера соответствующей начальным условиям проведения эксперимента.

Здесь можно отметить, что электрофизические показатели сухого бимодала марки FB 2310 меняются незначительно. Следовательно, для него даже незначительное количество поглощенной влаги (рисунок 40) оказывает превалирующее влияние на ВЧ-разогрев.

На основе приведенных значений электрофизических параметров влажных и нагретых сухих полимерных материалов: бимодального полиэтилена FB2310 и полипропилена Н030 видна различная картина по изменению показателей ε' , ε'' и $tg\delta$. Как было сказано выше, исследуемые полимерные материалы обладают ненулевым водопоглощением [34, 35], и в процессе ВЧ-нагрева происходит их высыхание, а изменение электрофизических параметров носит сложный и неоднозначный характер.



1 – ε' (диэлектрическая проницаемость), 2 – ε'' (коэффициент диэлектрических потерь), 3 – $\text{tg}\delta$ (тангенс угла диэлектрических потерь)

Рисунок 40 – Электрофизические показатели сухого бимодала FB 2310 в зависимости от температуры

Таким образом, была выдвинута гипотеза о том, что при нагреве непolarных полимерных материалов марки бимодал FB 2310 и полипропилен Н 030 в процессе их сушки возможны ситуации с тремя различными продолжениями изменения характера процесса электротермии.

График гипотетического развития трех ситуаций при сушке показан на рисунке 41.

Процесс сушки начинается при температуре $T_{\min}$, соответствующей начальным условиям технологического процесса. Изменение температуры от $T_{\text{начала сушки}}$ до $T_{\text{оконч. сушки}}$ за соответствующее время $\tau_{\text{начала сушки}}$ до $\tau_{\text{оконч. сушки}}$ приводит к интенсивной потере влаги, а далее изменение температуры осуществляется по двум возможным сценариям:

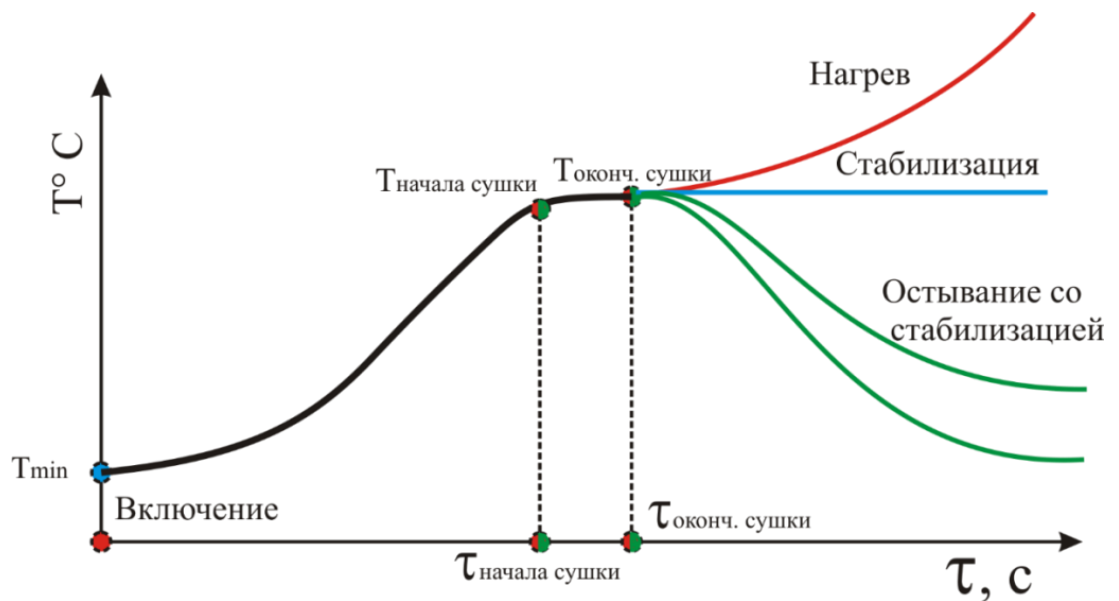


Рисунок 41 – Гипотетический характер изменения нагрева в процессе сушки полимерных материалов

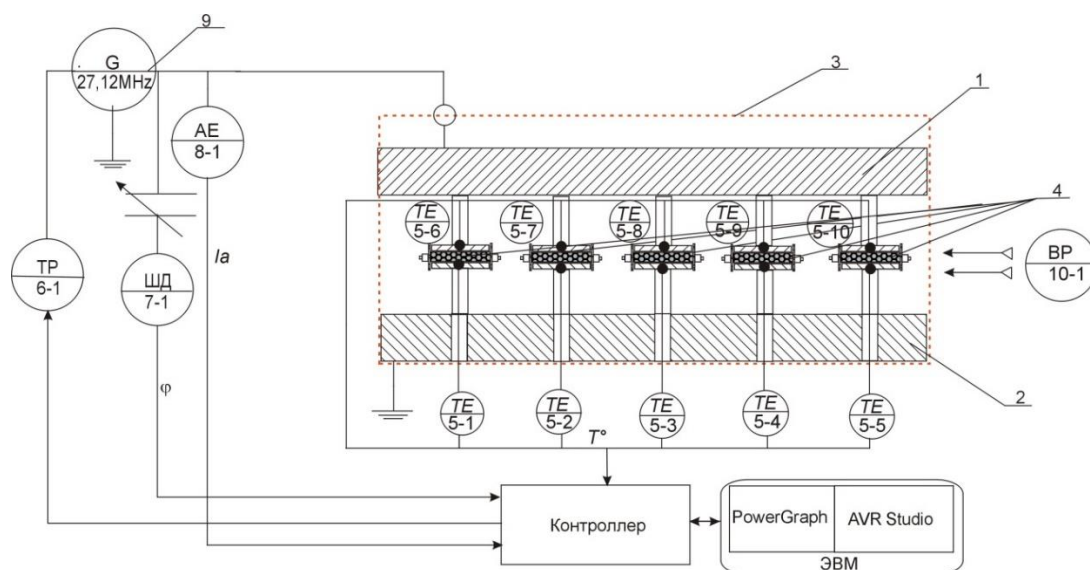
1. Продолжение нагрева с измененной динамикой говорит о том, что, повышение температуры оказывает значительное влияние на $\operatorname{tg}\delta$;
2. Падение температуры с дальнейшей стабилизацией на одной из возможных температур T_{cm1} , T_{cm2} , T_{cm3} , определяемой потребляемой мощностью диэлектрического нагрева и конвективными потерями.

С целью подтверждения принятой гипотезы были проведены серии экспериментов по сушке полимеров в ВЧ-поле.

2.4.3 Экспериментальное исследование динамики процесса ВЧ-сушки с использованием АСНИ-ВЧ

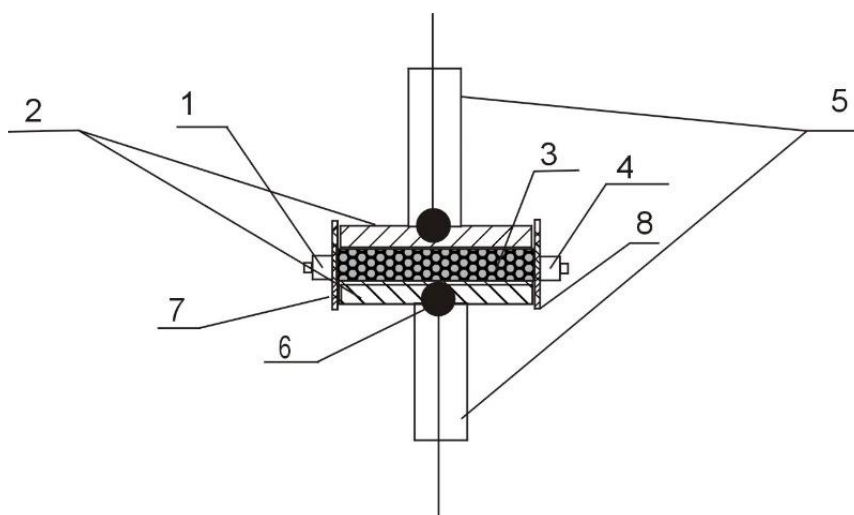
На основе полученных значений электрофизических параметров влажных и нагретых сухих полимерных материалов эксперименты проводились с использованием АСНИ-ВЧ, разработанной на основе промышленного оборудования УЗП-2500 школой высокочастотной электротермии ИрГУПС [22], и модернизированного в рамках настоящей работы. Схема модернизированной АСНИ

ВЧ-сушки многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов представлена на рисунках 42, 43, 44.



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 42 – Схема модернизированной АСНИ ВЧ-сушки многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов



1-4 – хомуты; 2 – верхний и нижний электрод рабочего конденсатора; 3 – полимер; 5 – винты

Рисунок 43 – Рабочий электрод



Рисунок 44 – Изображение модернизированной АСНИ ВЧ-сушки многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов

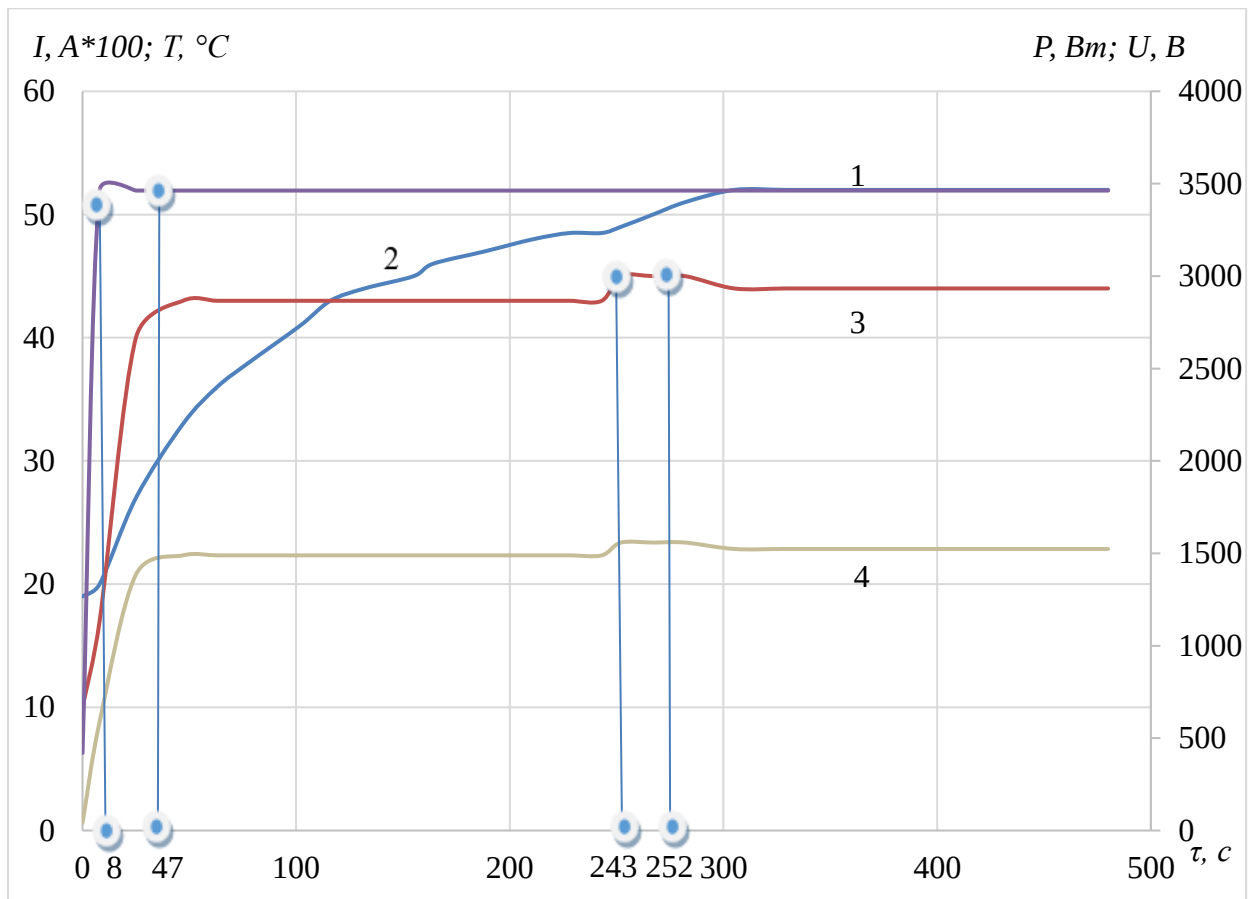
Технологическая оснастка АСНИ с аппаратно-программным обеспечением процессов увлажнения, акклиматизации, сушки и управления со стабилизацией анодного тока. Электроды были выбраны диаметром по 56 мм поскольку конденсаторов всего 5 штук, то общая площадь составляет $2461,76 \text{ мм}^2$, что в свою очередь равно максимальной обрабатываемой площади высокочастотного оборудования. Толщина между обкладками рабочего конденсатора равна 7,8 мм. Это обусловлено тем, что исследуются 5 видов полимерных материалов, а толщина гранул полимера около 1,2 мм и в сумме составляет 7,8 мм толщина между обкладками конденсатора [26, 102].

Рассмотрим принцип работы установки. Гранулы полимеров помещаются между электродами (обкладками) 2 рабочего конденсатора, который подсоединен к ВЧ-генератору. На нижнем и верхнем электроде было изготовлено специальное отверстие для размещения терморезисторов при контроле температуры в полимерных образцах. При включении ВЧ-генератора, мощность которого регулируется шаговым двигателем 7 – 1, датчик тока 8 – 1 автоматически начинает измерять анодный ток. В усовершенствованной системе температура регулируется с помощью терморезисторов: 5-1, 5-2, 5-3, 5-4, 5-5, 5-6, 5-7, 5-8, 5-9, 5-10 только при отключенном ВЧ-генераторе, так как в этом случае не происхо-

дит так называемых наводок на термодатчик, что в свою очередь дает максимально точные результаты измерения. Выходные сигналы от терморезистора, датчика тока, шагового двигателя поступают на контроллер, который в свою очередь соединен с персональным компьютером через СОМ-порт.

Модернизированная автоматизированная система управления процессом сушки полимерных и композиционных материалов за счет экспериментальной установки, созданной на основе оборудования УЗП-2500, в которую введен блок управления с написанной управляющей программой, а управляемым параметром является величина анодного тока, а также напряженность поля, изменяющаяся квадратично по которой осуществляется управления температурой нагрева для сушки. По экспериментальным исследованиям возникла проблема перегрева и прогара полимерного образца. Поэтому было принято решение добавить автоматическое регулирование мощности ВЧ-генератора за счет установки шагового двигателя с ременным редуктором, также в этом механизме была вмонтирована рукоятка регулировки мощности [26, 55, 59, 95, 100].

На графиках (рисунок 45 и 46) показана электротермическая сушка в ВЧ-поле (частота излучения $f=27,12$ мГц, напряжение $U=3460$ В, площадь образца $S=2826$ мм², толщина образца $d=7$ мм) бимодала марки FB 2310 кондиционированного в условиях влажности и кондиционированного внутри емкости при погружении в воду.



1 – напряжение, U , В; 2 – температура, T , °C; 3 – ток, I , А; 4 – мощность, P , Вт

Рисунок 45 – Показатели работы АСНИ ВЧ-сушки полимерного материала марки бимодал FB 2310 кондиционированного в условиях влажности

В процессе сушки неполярного бимодалного полимера на графиках наблюдаются следующие ключевые этапы. В начальный период (0 – 8 секунд) происходит резкое повышение напряжения, за счет установки его в ручной режиме в значение близкое к максимальному и затем стабилизируется. Анодный ток на этом фоне возрастает и достигает максимума примерно к 47-й секунде: это означает, что при неизменном напряжении суммарное сопротивление системы уменьшается (за счет нагрева и наличия проводящих влагосодержащих участков), поэтому через полимер проходит наибольший ток, что соответствует наиболее интенсивному вводу энергии и активной стадии испарения влаги.

На участке примерно с 243 по 252 секунды, уже после длительной стабилизации, наблюдается повторное небольшое увеличение тока с последующей стабилизацией, а затем его уменьшение и новое плато. Это можно связать с ло-

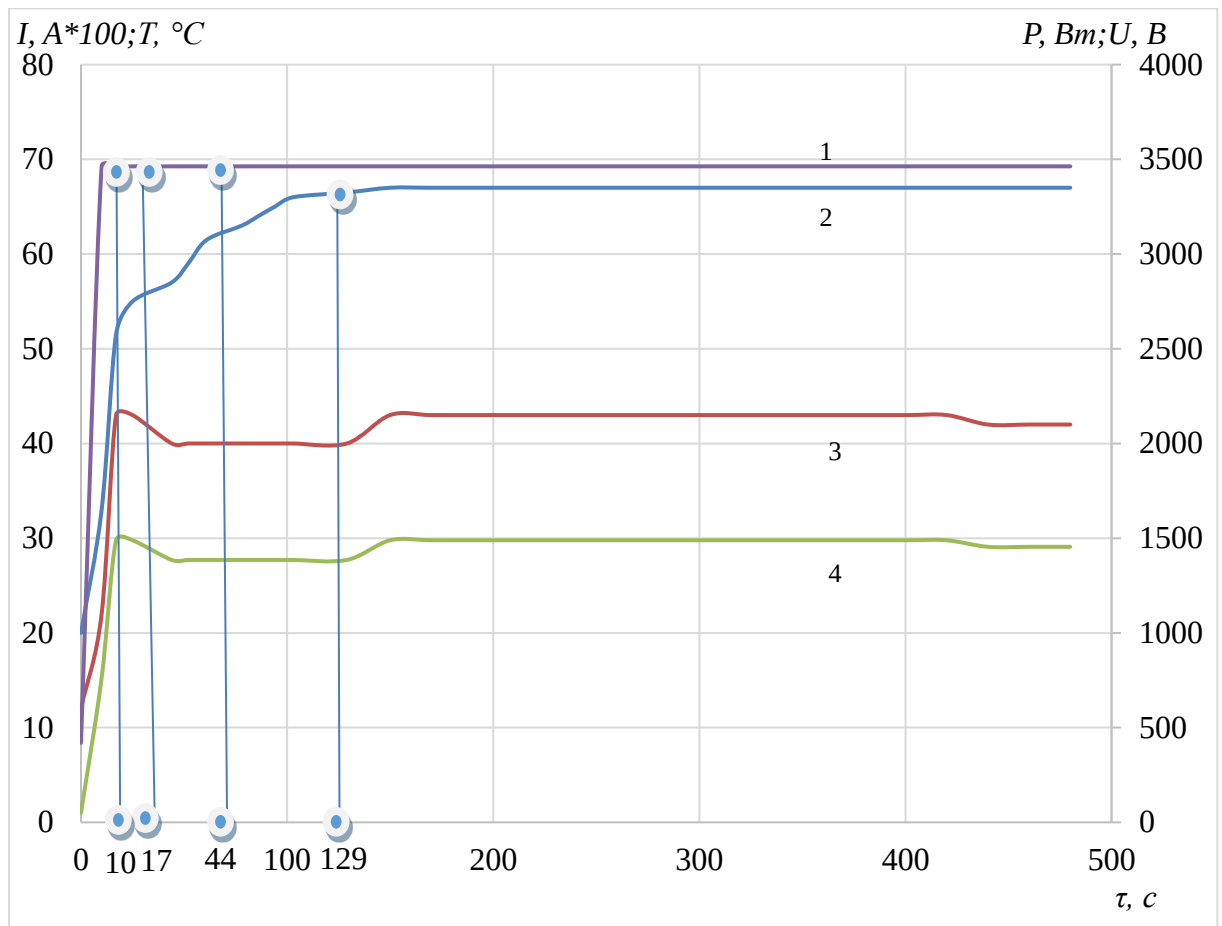
кальным перераспределением температуры и влаги внутри слоя полимера (догрев более холодных и чуть более влажных зон), а также релаксационными изменениями в структуре полимера.

Температурная кривая при этом плавно растет и затем выходит на плато на 53 °С без резких скачков: это 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.

В процессе сушки слабополярного бимодального полимера на графиках наблюдаются следующие ключевые этапы. В начальный период (0 – 10 секунд) происходит резкое повышение напряжения, за счет установки его в ручном режиме в значение близкое к максимальному и затем стабилизируется. В это же время увеличивается и температура, достигая 51,5 °С, что соответствует началу процесса сушки. Анодный ток возрастает с начальных значений и достигает пика примерно к 17-й секунде, указывая на активное поглощение энергии полимером.

На участке с 17 по 44 секунды наблюдается снижение анодного тока, что связано со снижением влажности.

Далее, с 44-й по 129 секунду, происходит стабилизация тока, что указывает на достижение термодинамического равновесия и завершение основной части процесса высушивания полимера. После 129-й секунд начинается новый установившийся режим. На графике видно умеренное вторичное повышение анодного тока и, соответственно, мощности при неизменной температуре, так как происходит донагрев и перераспределение энергии внутри сухого материала, релаксация структуры, выравнивание температуры по толщине слоя, стабилизация электрофизических характеристик.



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

Рисунок 46 – Показатели работы АСНИ ВЧ-сушки полимерного материала марки бимодал FB 2310 кондиционированного внутри емкости при погружении в воду бимодала FB2310

Можно сказать, что к этому времени полимер уже высушен и эти изменения трактуются не как продолжение сушки, а как процесс ее стабилизации в объеме полимерного материала.

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

В начальной стадии нагрева при динамическом повышении температуры в полимерном материале происходит активное испарение воды и гидратных соединений, находящихся на поверхности полимера. Этот этап длится до 103 секунды и сопровождается увеличением коэффициента диэлектрических потерь (ϵ'') (рисунок 38), что проявляется в виде первого экстремума тока. Экстремум

анодного тока в начале говорит о состоянии материала в плане содержания влаги. В результате, при стабилизации всех параметров можно говорить об окончательном удалении влаги и сушке полимера.

2.4.4 Формирование комплекса контролируемых параметров процесса ВЧ-сушки

Исходя из полученных результатов сушки (рисунок: 45, 46) можно сказать, что гипотеза подтверждается постоянством температуры и соответственно эксперименты открывают новые контролируемые параметры процесса в виде температуры и напряжения, а вспомогательным контролируемым параметром состояния материала является анодный ток.

Дополнительно выявлен факт резкого уменьшения анодного тока на начальном этапе нагрева для выявления неблагоприятных условий хранения или транспортировки материала.

Также контролируемым параметром является пробойное напряжение уменьшение, которого на 20% определяет рабочее напряжение. Ожидание в процессе сушки стабилизации температуры и ее выдержка, идентифицирует состояние материала, как сухое, и завершает процесс.

На основе выше изложенного были предложены два метода идентификации:

1. 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.

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

На основе анализа экспериментальных данных и требований к безаварийной работе оборудования (ограничение по пробую, токовой перегрузке и термической деструкции полимера) установлены предельные значения каждого параметра. С целью систематизации полученных сведений, а также для последующего использования при синтезе алгоритмов управления, все выявленные параметры сведены в таблицу 7.

Таблица 7 –Параметры АСУ ТП

Параметры	Предельные значения	Использование в АСУ ТП	Диапазон изменения в процессе обработки
Уставки			
V , м/с – скорость воздушного потока вентилятора обдува для удаления испарившейся влаги	1,7	Работает в релейном режиме в состоянии ВКЛ/ВЫКЛ в начале и в конце цикла	$V = \text{const}$
I_{max} , А – максимальный анодный ток ВЧ-генератора	0,9 (УЗП-2500); 1,4 (УЗП-6000)	Идентифицирует влажность материала и момент завершения сушки по стабилизации	0,2 - 0,9 (УЗП-2500); 0,2 - 1,4 (УЗП-6000)
T_{max} , С° – максимальная температура обработки	$0,9T_{\text{плав}}$ – для материала обладающего наименьшей температурой плавления	для предотвращения перегрева полимерного материала	$T = 20 - 0,9T_{\text{плав}}$
$U_{\text{раб}}$, В – напряжение на обкладках рабочего конденсатора	$0,9U_{\text{max}}$, где U_{max} максимальное напряжение на обкладках рабочего конденсатора. $U_{\text{max}} = 4000$ (УЗП-2500); $U_{\text{max}} = 6000$ (УЗП-6000)	Задается на весь цикл, определяет мощность тепловыделения и безопасный режим	$U = 0,9U_{\text{max}}$
$k_{\text{дчр}}$ – коэффициент динамики частичных разрядов	при $k_{\text{дчр}} = 3 \Delta\tau_{\text{чр}} < 1,2$ с	Защита – контроль предпробойного состояния, предотвращение пробоя	3 разряда удовлетворяющих условиям
Контролируемые параметры			
$U_{\text{раб}}$, В – Напряжение на обкладках рабочего конденсатора	$0,9U_{\text{max}}$	Задается на весь цикл, определяет мощность тепловыделения и безопасный режим	$U = \text{const}$

Продолжение таблицы 7

Параметры	Предельные значения	Использование в АСУ ТП	Диапазон изменения в процессе обработки
T_n , °С – Температура на нижней границе полимера	$T_n < T_{max}$	Контролирует достижение температуры сушки и предотвращает перегрев	От 20 °С до T_{max}
T_v , °С – Температура на верхней границе полимера	$T_v < T_{max}$	Контролирует достижение температуры сушки и предотвращает перегрев	От 20 °С до T_{max}
I_a , А – Анодный ток	$I_a \geq 0,9$ (УЗП-2500); $I_a \geq 1,4$ (УЗП-6000)	Идентифицирует влажность по динамике изменения материала и момент завершения сушки по стабилизации	$I_a = \text{const}$
I_a , А – Анодный ток	$I_a \geq I_{max}$	Контроль допустимой токовой нагрузки	$I_a = 0,9$
$n_{чр}$, 1/с – Количество частичных разрядов	при $k_{дчр} \leq 3 \Delta \tau_{чр} \leq 1,2$ с	Контроль предпробойного состояния, предотвращение пробоя	$n_{чр} = \text{const}$
Управляющее воздействие			
U , В – Рабочее напряжение ВЧ-генератора	От 500 – 6000	Задается на весь цикл, определяет мощность тепловыделения и безопасный режим	$U = f(\varphi)$
φ , град. – Угол поворота настроечного конденсатора	13,8 – 0	Изменяет напряжение на обкладках рабочего конденсатора	$\varphi = 1,2$
T_n , °С – Температура на нижней границе полимера	$T_n > T_{max}$	Контролирует достижение температуры сушки и предотвращает перегрев	$T_n = f(\varphi)$
T_v , °С – Температура на верхней границе полимера	$T_v > T_{max}$	Контролирует достижение температуры сушки и предотвращает перегрев	$T_v = f(\varphi)$
I_a , А – Анодный ток	0,9 (УЗП-2500); 1,4 (УЗП-6000)	Идентифицирует влажность по динамике изменения материала и момент завершения сушки по стабилизации	0,2 - 0,9 (УЗП-2500); 0,2 - 1,4 (УЗП-6000)
$n_{чр}$, 1/с	при $k_{дчр} \leq 3 \Delta \tau_{чр} \leq 1,2$ с	Контроль предпробойного состояния, предотвращение пробоя	$n_{чр} = \text{const}$
Выходной параметр			
$\varphi\%$ – Абсолютная влажность в % по массе полимера	9 – 0,02	Идентифицирует влажность материала	$\varphi_{\text{const}} = f(T, I)$

В соответствии с разработанной структурной и функциональной схемой АСУ ТП, информационно-управляющая среда системы включает четыре группы параметров: уставки, контролируемые переменные, управляющие воздействия и выходной (качественный) параметр. Граничные условия и характер изменения каждого параметра определены экспериментально и регламентированы требованиями безопасности электротермического оборудования.

1. Уставки

Уставки определяют границы допустимых режимов и формируются оператором на основе паспортных данных партии полимера и электрофизических свойств, полученных на этапе АСНИ.

1. Скорость воздушного потока вентилятора (V , м/с):

- Зафиксирована на уровне 1,7 м/с;
- Обеспечивает удаление испаряемой влаги из рабочей зоны, предотвращая вторичную конденсацию.
- релейный характер работы (ВКЛ/ВЫКЛ на старте и по окончании цикла); $V = \text{const}$ в течение всей сушки.

2. Максимально допустимый анодный ток (I_{max} , А):

- Значение: зависит от модели оборудования. Для УЗП-2500 – 0,9 А; для УЗП-6000 – 1,4 А;
- Роль: верхний порог токовой нагрузки, идентифицирующий критическую влажность материала (пик диэлектрических потерь) и зону перегрузки.

3. Максимальная температура обработки (T_{max} , °С):

- Определяется как 0,9 от температуры плавления ($T_{\text{плав}}$) компонента смеси с наименьшей термостойкостью.
- Предотвращает переход полимера в вязкотекучее состояние и термическую деструкцию.

4. Рабочее напряжение на конденсаторе ($U_{\text{раб}}$, В):

- Составляет 0,9 от $U_{\text{мах}}$ (пробойного напряжения для данной конфигурации электродов). Для УЗП-2500 — 3600 В, для УЗП-6000 — 5400 В;

- Определяет напряженность электрического поля и удельную мощность тепловыделения.

5. Коэффициент динамики частичных разрядов ($k_{ДЧР}$):

- При $k_{ДЧР} = 3$ и интервале между разрядами $\Delta\tau_{чр} < 1,2$ с.
- является защитным параметром, сигнализирующим о приближении к предпробойному состоянию диэлектрика

2. Контролируемые параметры

Эти переменные непрерывно измеряются датчиками (ЧЭ) и служат индикаторами текущего состояния объекта. Их стабилизация является критерием завершения процесса.

1. Напряжение на обкладках рабочего конденсатора ($U_{раб}$, В): измеряется косвенно (по углу поворота подстроечного конденсатора) и поддерживается строго постоянным ($U_{раб} = \text{const}$) в течение всего цикла для обеспечения инвариантности тепловыделения.

2. Температура на нижней и верхней границах полимерного слоя (T_n , T_v , °С):

- Дублирующий контроль температурного поля по толщине загрузки. Измерение производится в паузах между циклами генерации (при $U=0$) для исключения ВЧ-наводок;

- Достижение $T_n = T_v = \text{const}$ свидетельствует о завершении массообменных процессов (сушки).

3. Анодный ток ВЧ-генератора (I_a , А):

- Мониторинг текущего влагосодержания. Динамика роста и последующая стабилизация тока коррелируют с удалением полярных молекул воды из полимера.

- Сравнение с I_{max} для аварийного отключения при коротком замыкании.

3. Управляющие воздействия (регулирование)

Это сигналы, которые формирует (контроллер) для изменения состояния объекта.

1. Рабочее напряжение ВЧ-генератора ($U_{\text{раб}}$, В):

- Не является константой для генератора; это функция угла поворота подстроечного конденсатора;

- Диапазон от 500 до 6000 В.

2. Угол поворота подстроечного конденсатора (φ , град.):

- Основной исполнительный механизм (Шаговый двигатель). Изменяя емкость в контуре генератора, МК влияет на амплитуду напряжения на рабочем конденсаторе.

- Д от начального угла (максимальная мощность) к конечному (0) по мере снижения тока в конце цикла. Коэффициент пересчета: 1,2 градуса на единицу изменения напряжения.

4. Выходной параметр (конечная цель управления). Этот параметр не измеряется напрямую в процессе, а рассчитывается косвенно по достижению стабилизации T и I_a .

Абсолютная влажность полимера ($\varphi\%$ по массе):

- Снижение с исходных 9% до нормируемых 0,02%;

- Поскольку неполярные полимеры не имеют экстремумов $tg\delta$, факт достижения $\varphi = 0,02\%$ фиксируется не по датчику влажности, а по комплексу критериев: $T = \text{const}$ и $I_a = \text{const}$ в течение заданного времени выдержки.

Таким образом, представленная совокупность параметров обеспечивает итеративный адаптивный алгоритм управления: МК сравнивает текущие T и I_a с уставками и воздействует на угол φ , пока не будет достигнуто состояние устойчивого баланса (плато на кривых нагрева и тока), что гарантированно соответствует требуемому качеству сушки.

Выводы по главе

Вторая глава диссертации показывает, что объектом управления является устройство реализации высокочастотного нагрева слабополярных и неполярных полимеров для которого последовательно выполнены идентификация, экспериментальное исследование и формирование измерительной базы для последующей автоматизации управления.

1. В главе обоснован выбор технически значимого, но слабо изученного в условиях ВЧ-поля класса рассматриваемых материалов (полипропилен, бимодальный полиэтилен и многокомпонентные смеси), относящиеся к слабополярным и неполярным полимерам. Показана неполнота данных по их электрофизическим характеристикам при реальных технологических условиях влажности и температуры.

2. Сформулирован комплекс задач: от выбора адекватных методов измерения электрофизических параметров до разработки аппаратуры, алгоритмов и программного обеспечения для автоматизированного эксперимента, что переводит чисто материаловедческую задачу в плоскость исследования управляемого технологического процесса.

3. Проведен критический анализ существующих методов определения электрофизических свойств полимеров, на основании которого обоснован выбор модифицированного резонансного метода и автоматизированной термогравиметрии, как ключевых инструментов идентификации объекта управления.

4. Разработаны и описаны: модифицированная измерительная ячейка ЭС–1Т; автоматизированный модуль АСНИ ЭФП, алгоритмы работы (подпрограммы $C1$, $Q1$; $C2$, $Q2$; $C2в$); автоматизированная установка термогравиметрии и увлажнения, что формирует законченный комплекс средств автоматизированных научных исследований технологического процесса.

5. Разработан автоматизированный модуль определения и оценки электрофизических параметров полимеров (АСНИ ЭФП), как составной части автоматизированной системы научных исследований высокочастотной обработки (АСНИ ВЧ).

6. Получены экспериментальные зависимости ε' , ε'' , $\operatorname{tg}\delta$ от влажности и температуры для полипропилена и бимодала в различных состояниях (сухие, увлажненные, после контакта с водой и дистиллированной водой), показано резкое возрастание потерь и мощности диэлектрического нагрева при увлажнении и нагреве, а также различная чувствительность материалов.

7. На основе анализа динамики электрофизических параметров и ВЧ-сушки сформулирована гипотеза о возможных сценариях изменения процесса (рост температуры, стабилизация, изменение характера нагрева) и проведены натурные эксперименты на модернизированной АСНИ ВЧ, что позволило предложить следующие методы идентификации:

- 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 соответствие условий транспортировки и хранения полимерного сырья требуемым по параметрам процесса ВЧ-обработки.

8. Исследованы процесс высокочастотного нагрева слабополярных и неполярных полимеров и устройство его реализации как объект управления и сформирован комплекс информативных контролируемых и управляемых параметров с целью идентификации процесса ВЧ-сушки.

3 Математическое моделирование процесса нагрева увлажненных многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов

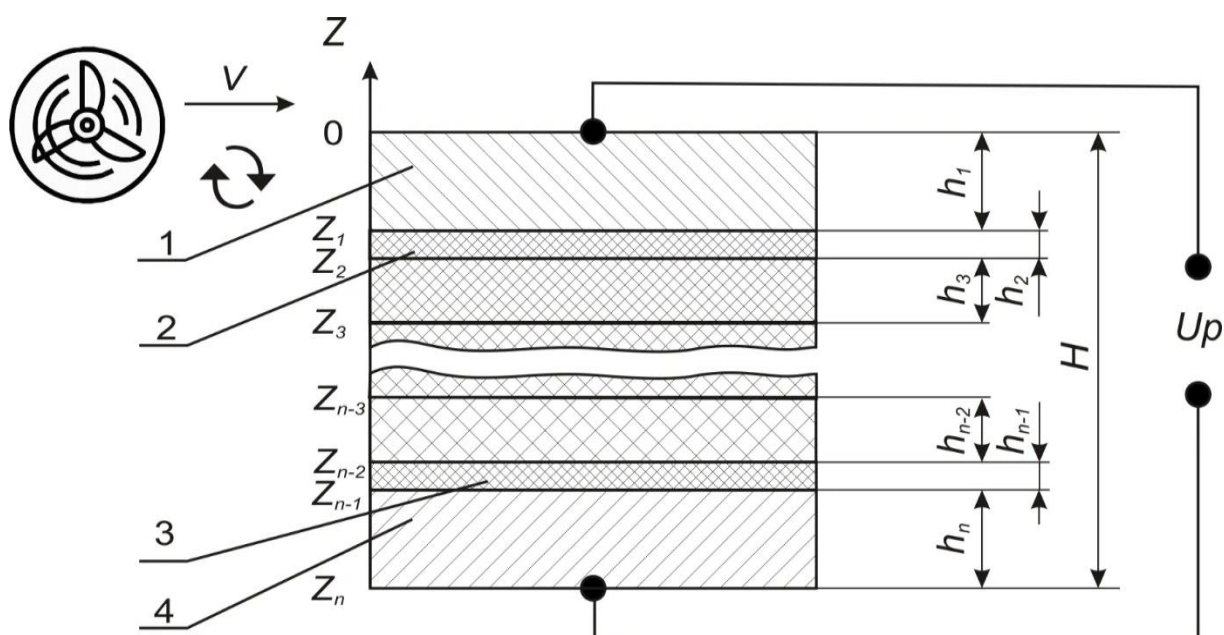
3.1 Математическая модель нагрева многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов с учетом коэффициента теплоотдачи

Во второй главе было определено, что многокомпонентные полимерные материалы, используемые при производстве упаковочной пленочной продукции, отличаются различной степенью нагрева: одни компоненты нагреваются более интенсивно, а другие – менее интенсивно. При этом при разогреве неполярных полимеров они изменяют степень своей полярности, выходя из группы неполярных.

Была сформулирована гипотеза о том, что, разогрев полимеров обладающих большей степенью полярности может обеспечить предварительный нагрев полимеров с меньшей степенью полярности в многокомпонентных составах. В этом случае процесс нагрева состоит из двух составляющих, первая из которых является электротермическим нагревом, а другая кондуктивным, направленным на нагрев слабополярных и неполярных полимерных материалов, входящих в состав многокомпонентных смесей.

Как было сказано во второй главе, полимеры могут содержать значительное количество влаги. При ее испарении может наблюдаться эффект вторичной конденсации на поверхности полимерных смесей. Основным методом предотвращения вторичной конденсации является интенсивная, принудительная вентиляция.

В рамках настоящей работы разработана технологическая система процесса ВЧ-сушки многокомпонентных смесей представленная ниже (рисунок 47).



1, 4 – высокопотенциальный и низкопотенциальный электроды рабочего конденсатора с координатами границ слоев 0, Z_1 , Z_{n-1} , Z_n , толщиной h_1 и 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 $h_3 \dots h_{n-2}$; U_p – напряжение на обкладках рабочего конденсатора; V – поток воздуха.

Рисунок 47 – Технологическая система ВЧ-сушки многокомпонентных полимерных смесей

Данная технологическая система отличается от ранее используемых [22, 58] наличием системы активной вентиляции и чередующихся слоев полимеров различной степени полярности.

В соответствии с [22] распределение температуры в технологической системе ВЧ-сушки многокомпонентных смесей в процессе обработки описывается системой уравнений нестационарной теплопроводности. Модификация системы дифференциальных уравнений для случая представленной технологической системы (рисунок 47) дает следующий результат (12):

$$\begin{cases}
 \rho_1 C_{p1}(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) & (1.1) \\
 \rho_2 C_{p2}(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial z} \right) & (1.2) \\
 \rho_3 C_{p3}(T_3) \frac{\partial T_3}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_3(T_3) \frac{\partial T_3}{\partial z} \right) + P_3(T_3) & (1.3) \\
 \dots & \\
 \rho_{n-2} C_{pn-2}(T_{n-2}) \frac{\partial T_{n-2}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{n-2}(T_{n-2}) \frac{\partial T_{n-2}}{\partial z} \right) + P_{n-2}(T_{n-2}) & (1.4) \\
 \rho_{n-1} C_{pn-1}(T_{n-1}) \frac{\partial T_{n-1}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{n-1}(T_{n-1}) \frac{\partial T_{n-1}}{\partial z} \right) & (1.5) \\
 \rho_n C_{pn}(T_n) \frac{\partial T_n}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_n(T_n) \frac{\partial T_n}{\partial z} \right) & (1.6)
 \end{cases} \quad (12)$$

Начальные условия (13):

$$T|_{\tau=0} = T_n, 0 \leq z \leq Z_n, \quad (13)$$

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

z – текущая координата рассматриваемого слоя технологической системы;

$\rho_i, \lambda_i(T), C_{pi}(T), P_i(T), \tau$ – плотность, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, удельная мощность внутреннего источника тепла, время соответственно. Здесь $i=1 \dots n$, где n – количество слоев технологической системы.

Первое и n -е 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 $\rho_3, \dots, \rho_{n-2}$ представляют собой насыпные плотности материалов и позволяют совместно с ранее определенными электрофизическими параметрами учесть использование гранулированного полимерного сырья.

Начальная температура технологической системы соответствует нормальным условиям (ГОСТ 12423-2013) [33].

Граничные условия на внешних границах электродов соответствуют условиям третьего рода (14), (15):

$$-\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_1(V, T_1) \cdot T_1, \quad (14)$$

$$-\lambda_n(T_n) \frac{\partial T_n}{\partial z} \Big|_{z=z_n} = \alpha_n \cdot T_n, \quad (15)$$

где $\Delta T_1, \Delta T_n$ – 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 [58, 22], в которых $\alpha_1 \dots \alpha_n$ обоснованно приняты равными нулю, в рассматриваемом случае сушки многокомпонентных обводненных полимеров ввести 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 (16):

$$\begin{cases} T_j = T_{j+1} \\ \lambda_j(T_j) \frac{\partial T_j}{\partial z} = \lambda_{j+1}(T_j) \frac{\partial T_{j+1}}{\partial z} \text{ при } z = z_j, (j = 1 \dots n - 1), \end{cases} \quad (16)$$

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

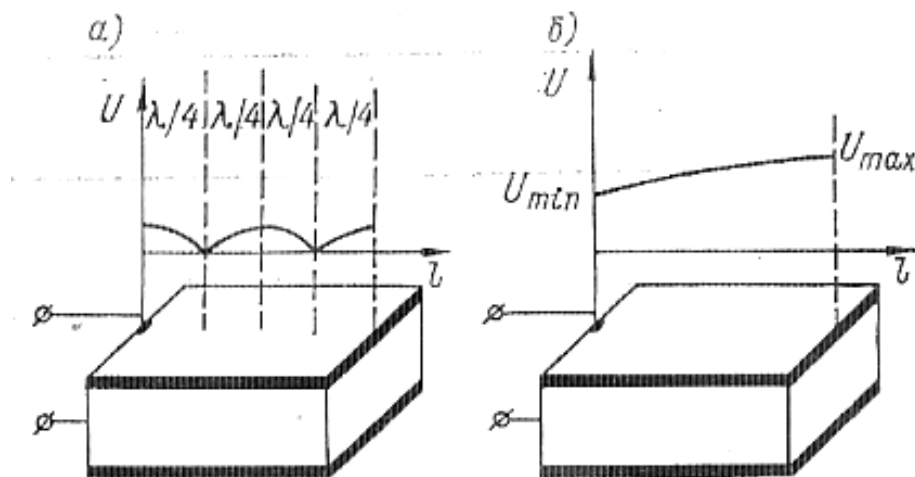
Удельная мощность $P_i(T)$ отлична от нуля только для полимеров, находящихся в диапазоне координат $Z_2 \dots Z_{n-2}$.

Следует отметить, что в правой части уравнений, описывающих тепловые процессы в полимерных материалах (1.3), (1.4) системы (1) указаны мгновенные удельные мощности $P_3(T_3) \dots P_{n-2}(T_{n-2})$, определение которых возможно расчетно-экспериментальным путем. При построении математической модели,

представленной в виде системы дифференциальных уравнений (12) с начальными (13) и граничными условиями: (14), (15), (16) использованы следующие допущения:

- в явном виде в структуре слоев отсутствуют воздушные прослойки между гранулами полимеров. Они учтены в виде уменьшенной насыпной плотности и фактических электрофизических показателей полимеров, определенных экспериментальным путем;

- мы имеем дело с однокоординатной пространственной размерностью модели благодаря однонаправленности ВЧ-поля и особенностям геометрии рабочего конденсатора, используемого при организации процесса электротермии, когда ширина и длина электродов значительно превосходит расстояния между ними и напряженность электромагнитного поля (E) равномерна по всей площади рабочего конденсатора (рисунок 7).



при: a – больше $\lambda/2$; b – меньше $\lambda/4$; ε' – диэлектрическая проницаемость материала; l_0 – максимальный линейный размер образца

Рисунок 48 – Распределение напряжения по пластине рабочего конденсатора

При частоте ВЧ-излучения 27,12 МГц его длина волны составит $\lambda \approx 11,06$ м. Как сказано в работе [58] при работе с электродами, имеющими габаритные размеры менее $\lambda/4$ длины волны (рисунок 48), можно пренебречь неравномерностью электромагнитного поля.

В явном виде не учтена необходимость технологической перфорации электродов для удаления влаги в процессе сушки. Уменьшение площади сече-

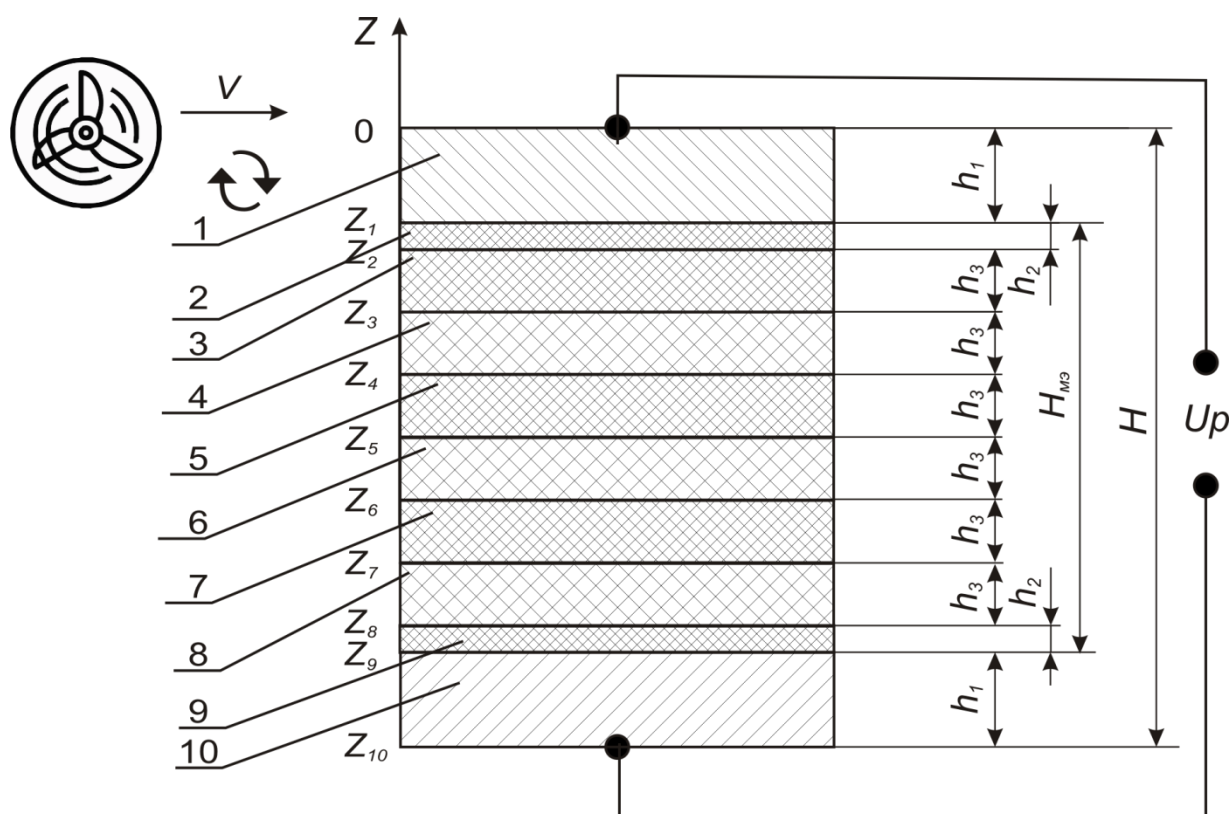
ния при перфорации электродов необходимо учитывать при проектировании технологической оснастки и выборе режимов обработки на реальном оборудовании.

3.2 Моделирование процесса сушки двухкомпонентного состава слабополярных и неполярных полимерных материалов

Описанную выше математическую модель, можно модифицировать для моделирования процесса сушки сколь угодно сложных многокомпонентных полимерных материалов. При этом, как было сказано выше, в реальных условиях смеси представляют собой двух, трехкомпонентные составы. Далее рассматривается технологическая система (рисунок 49) для нагрева (сушки) двухкомпонентного гранулированного полимерного состава (бимодал марки FB 2310, полипропилен марки Н 030) с размерами гранул $h_3 \approx 1,1 - 1,2$ мм.

Опытным путем было определено расстояние между электродами $M_{эл} = 6h_3 + 2h_2 = 7,8$ мм при толщине теплоэлектроизолятора 0,4 мм для моделирования процесса ВЧ-нагрева обеспечивающего, с одной стороны, развитие необходимой мощности нагрева, с другой возможность моделирования чередования слоев нагреваемого материала, в данном случае между электродами помещается шесть чередующихся слоев полимеров.

Технологическая система для случая последовательного чередования полимеров представленная на рисунке 47 приобретает вид десятислойной системы, представленной на рисунке 49.



1, 10 – высокопотенциальный и низкопотенциальный электроды рабочего конденсатора с координатами границ слоев 0, Z_1 , Z_9 , Z_{10} , толщиной h_1 ; 2, 9 – теплоизоляторы верхний и нижний с координатами границ слоев Z_1 , Z_2 , Z_8 , Z_9 , толщиной h_2 , соответственно и расположенными между ними многослойными полимерными материалами с координатами границ слоев Z_2 , Z_3 , Z_4 , Z_5 , Z_6 , Z_7 , Z_8 толщиной h_3 ; U_p – напряжение на обкладках рабочего конденсатора; V – поток воздуха.

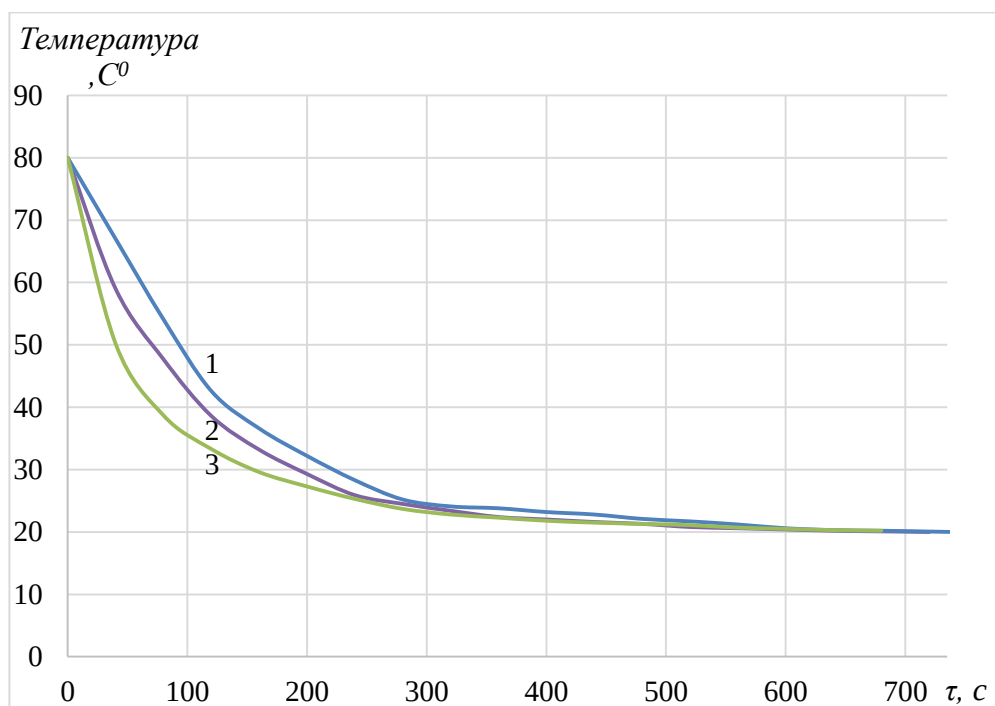
Рисунок 49 – Технологическая система ВЧ-сушки многокомпонентных смесей

Система уравнений (12) приобретает следующий вид (17):

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_1 C_{p1}(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) \\ \rho_2 C_{p2}(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial z} \right) \\ \rho_3 C_{p3}(T_3) \frac{\partial T_3}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_3(T_3) \frac{\partial T_3}{\partial z} \right) + P_3(T_3) \\ \rho_4 C_{p4}(T_4) \frac{\partial T_4}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_4(T_4) \frac{\partial T_4}{\partial z} \right) + P_4(T_4) \\ \rho_5 C_{p5}(T_5) \frac{\partial T_5}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_5(T_5) \frac{\partial T_5}{\partial z} \right) + P_5(T_5) \\ \rho_6 C_{p6}(T_6) \frac{\partial T_6}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_6(T_6) \frac{\partial T_6}{\partial z} \right) + P_6(T_6) \\ \rho_7 C_{p7}(T_7) \frac{\partial T_7}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_7(T_7) \frac{\partial T_7}{\partial z} \right) + P_7(T_7) \\ \rho_8 C_{p8}(T_8) \frac{\partial T_8}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_8(T_8) \frac{\partial T_8}{\partial z} \right) + P_8(T_8) \\ \rho_9 C_{p9}(T_9) \frac{\partial T_9}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_9(T_9) \frac{\partial T_9}{\partial z} \right) \\ \rho_{10} C_{p10}(T_{10}) \frac{\partial T_{10}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{10}(T_{10}) \frac{\partial T_{10}}{\partial z} \right) \end{array} \right. \quad (17)$$

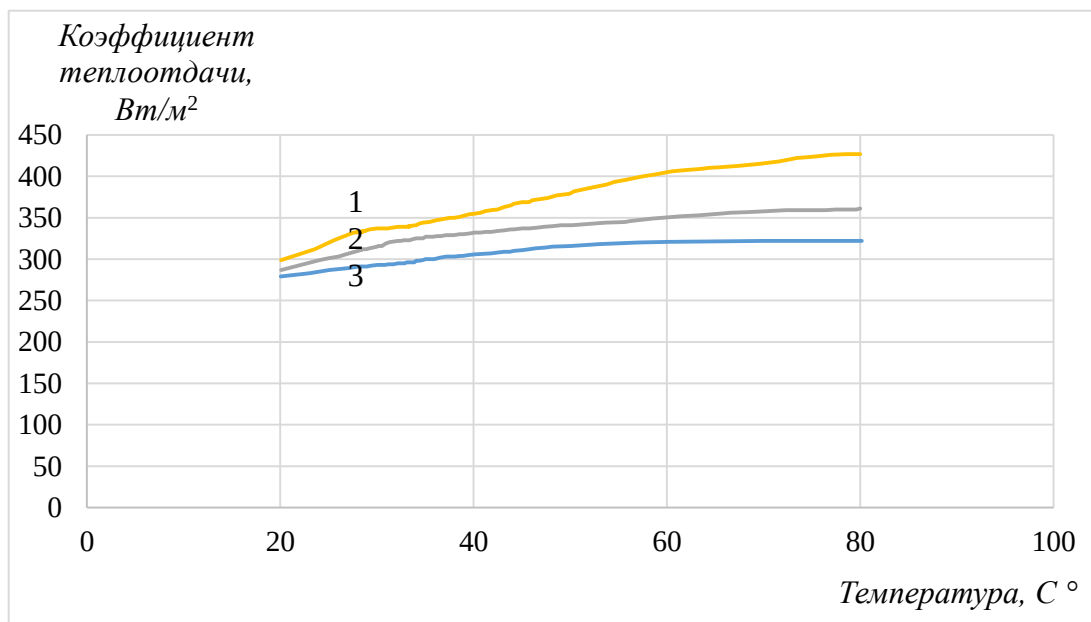
Для определения коэффициента теплоотдачи α_1 , α_{10} , как необходимого параметра, учитываемого в граничных условиях третьего рода, использовались методика и реализующая ее программное обеспечение, описанные в работе [11]. Методика основана на расчете температурного поля по исходным данным в соответствии с технологической системой (рисунок 49) методом конечных разностей и определения коэффициента теплоотдачи методом последовательного приближения к достижению экспериментально полученных кривых охлаждения поверхности электродов.

На основе экспериментально снятых кривых охлаждения, представленных на рисунке 50, с использованием ранее описанного программного обеспечения методом последовательного приближения были определены температурные зависимости коэффициентов теплоотдачи (рисунок 51), применяемые при моделировании процессов сушки полимерных композиций.



1 – полипропилен Н 030; 2 – технологическая смесь; 3 – бимодал FB 2310

Рисунок 50 – Кривые охлаждения полимерных материалов и их технологической смеси



1 – бимодал FB 2310; 2 – технологическая смесь; 3 – полипропилен Н 030

Рисунок 51 – Температурные зависимости коэффициентов теплоотдачи при сушке полимерных материалов и их смесей

Рисунок 51 показывает, что имеются температурозависимые коэффициенты теплоотдачи для предельных концентраций смеси полимеров (Полипропилен Н 030 – 100%, Бимодала FB 2310 – 0% или Полипропилен Н030 – 0%, Бимодала FB10 – 100%). Учет другого процентного содержания смеси возможен на основе интерполирования данных по коэффициентам теплоотдачи предельных состояний.

Расчет температурного поля численным методом, возможно, осуществить следующими высокотехнологичными программами: Autodesk inventor, MSC Nastran, MSC Marc, MSC Sinda [11, 66, 88]. Из всех перечисленных программ наиболее оптимальной для тепловых расчетов является MSC Sinda.

Данное программное обеспечение осуществляет сложные тепловые расчеты методом конечных разностей, а полученные результаты можно использовать для создания системы автоматизированного управления электротермической обработки слабополярных и неполярных полимеров [75, 76, 81, 84, 85, 86, 88, 97].

Важный этап конечно-разностного анализа, обеспечивающий получение адекватных этапов расчета, заключается в правильном выборе типа и размера конечно-разностной сетки [2, 15, 63, 67, 104, 105].

Структурная схема расчета системы уравнений нестационарной теплопроводности с внутренними источниками теплоты во всем объеме слоев технологической системы с заданным интервалом времени во всем диапазоне температур обработки показана на рисунке 52.

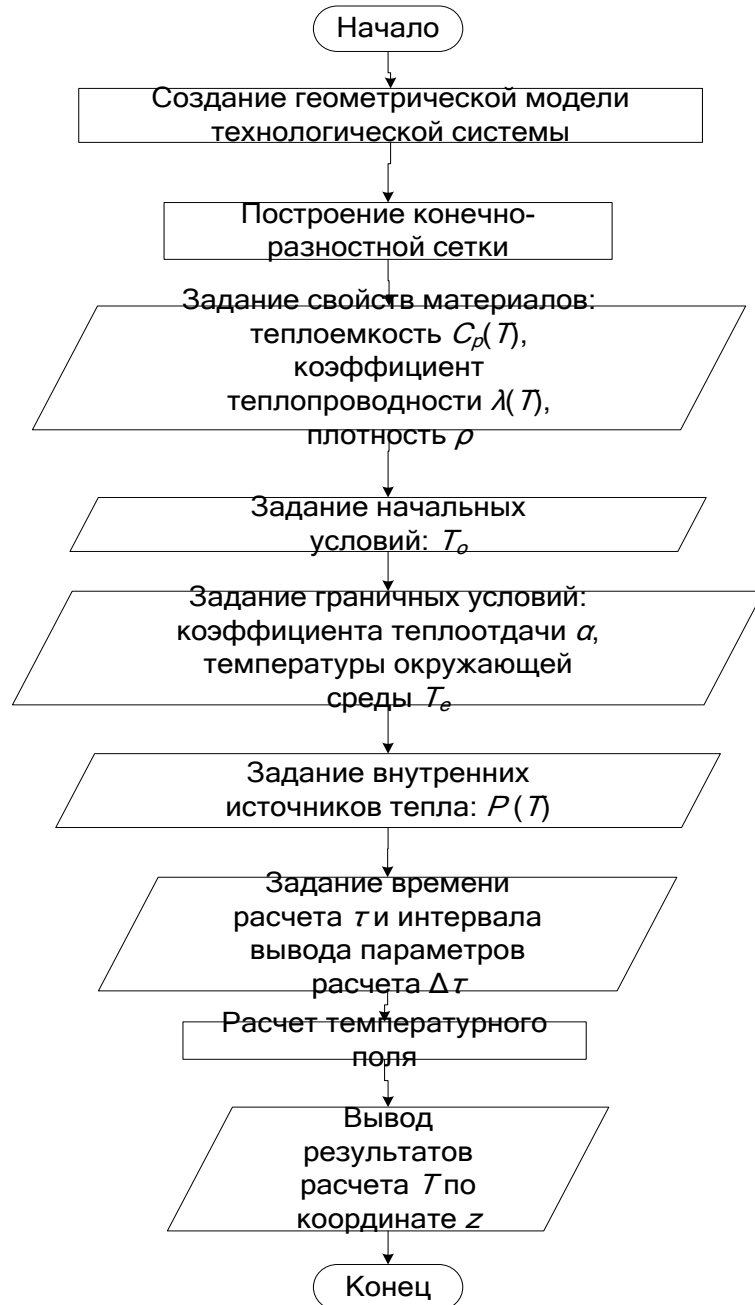


Рисунок 52 – Структурная схема расчета системы уравнений нестационарной теплопроводности с внутренними источниками теплоты во всем объеме слоев технологической системы с заданным интервалом времени во всем диапазоне температур обработки

Выбор размеров конечно-разностной сетки осуществлялся экспериментально в соответствии с условием решаемых задач. Так, для проведения теплового анализа модели простой геометрии необходимо использовать регулярную сетку с различными расстояниями по координатным осям между узлами. Для десятислойной технологической системы (рисунок 49) с размерами слоев, ука-

занными ранее, были проведены исследования влияния уменьшения шага конечно-разностной сетки на точность вычисления. За минимальный размер шага по координате сетки был принят $h_{p \min} = 0,21$ мм, что соответствует подобным исследованиям, представленным в работе [11].

Ранее для решения подобных задач научной школой ВЧ-электротермии ИрГУПС была разработана методика определения количества узлов конечно-разностной сетки по толщине технологической системы [11, 22, 58], обеспечивающих минимальный по времени расчет температуры приемлемой точности (2 °С). Размер между узлами лежит в диапазоне $0,21 \leq h_p \leq 1,36$ мм. Принимая во внимание размер гранул многокомпонентного, используемого при экспериментально исследовании полимера, диапазон h_p был сокращен до следующего $0,21 \leq h_p \leq 1,2$ мм. Установлено дополнительное условие – толщина каждого слоя технологической системы должна быть кратной шагу сетки и размеру гранулы полимера, составляющего данный слой.

3.3 Оценка влияния различных чередований слоев на динамику ВЧ-нагрева технологической системы

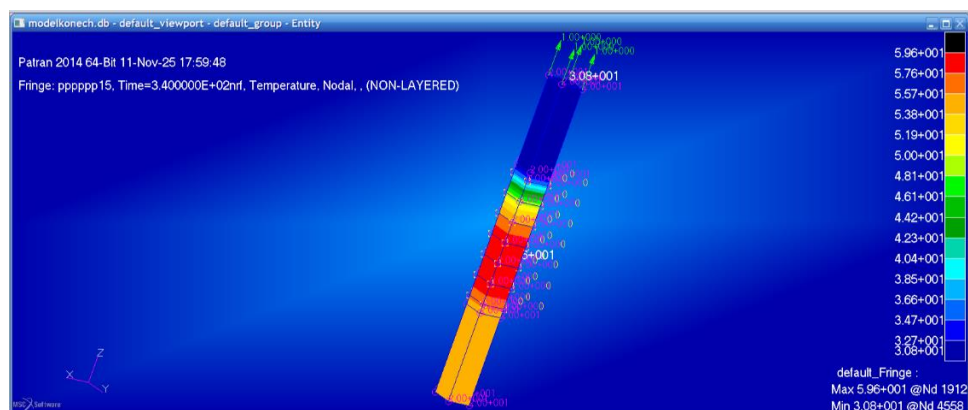
Дальнейшее моделирование производилось при следующих вариантах чередования слоев полимерных материалов (таблица 8) для анализа динамики их разогрева и определения времени $t_{\text{суш}}$ достижения полимерами температуры сушки $T_{\text{суш}}$.

Таблица 8 – Варианты чередования слоев полимеров в технологической системе

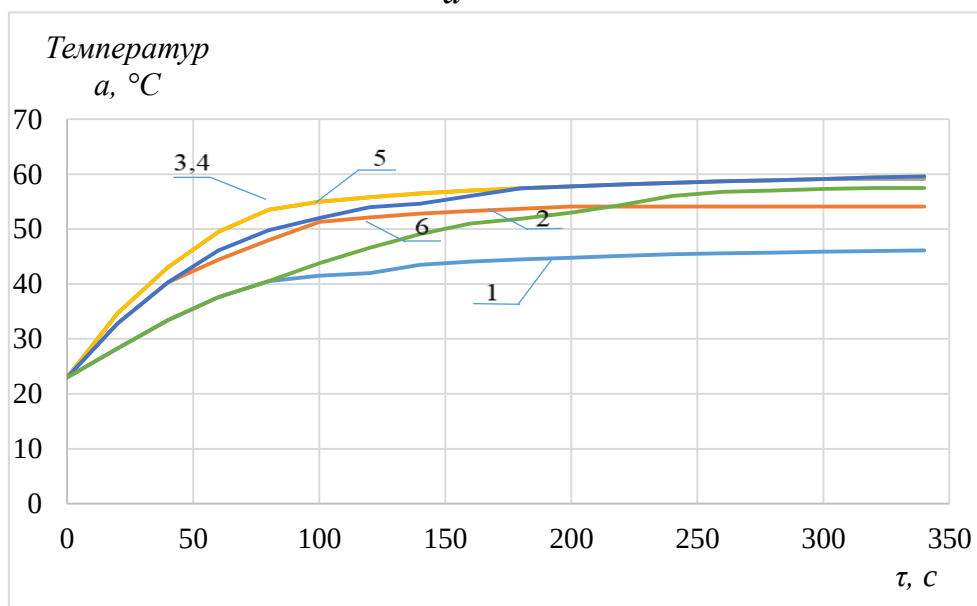
№ варианта чередования	Последовательность чередования слоев
1	pppppp
2	bbbbbb
3	ppbbbb
4	bbbppp
5	bbppbb

р – Полипропилен марки Н030, b – Бимодал марки FB 2310

На рисунках: 53, 54, 55, 56, 57 представлены результаты численного моделирования процесса ВЧ-нагрева десятислойной технологической системы. Каждый рисунок включает двумерное температурное поле по толщине системы и графики изменения температуры отдельных слоев во времени, что позволяет оценить динамику нагрева, равномерность распределения температуры и достижение режимов сушки.



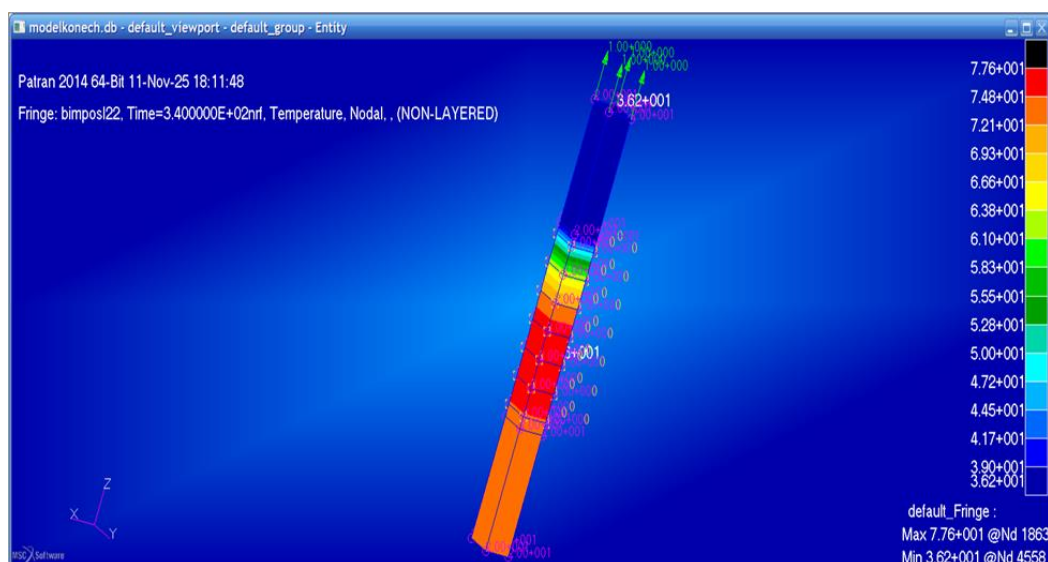
a



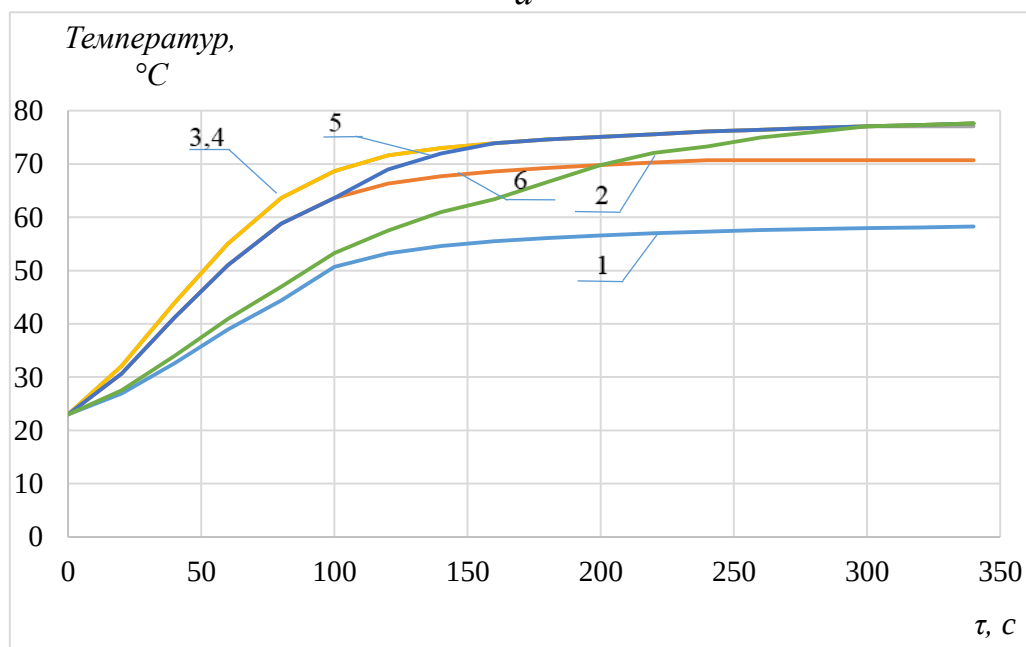
б

1 – полипропилен Н 030, 2 – полипропилен Н 030, 3 – полипропилен Н 030, 4 – полипропилен Н 030, 5 – полипропилен Н 030, 6 – полипропилен Н 030

Рисунок 53 – Вариант чередования №1 «rrrrrrr». *a* – двумерное температурное поле по толщине технологической системы, *б* – графики изменения температуры слоев во времени



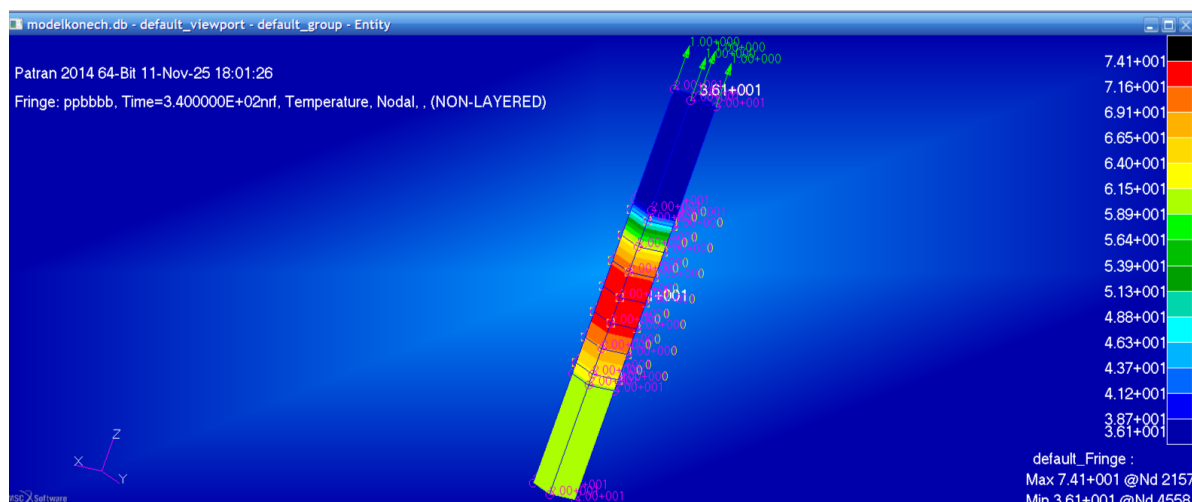
а



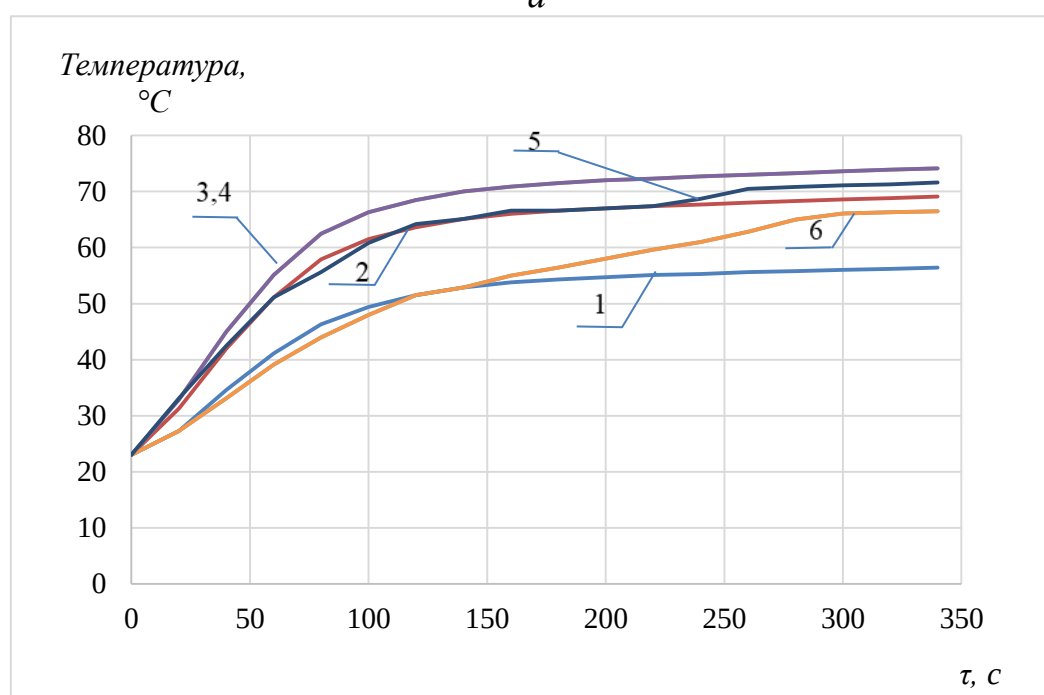
б

1 – бимодал марки FB 2310; 2 – бимодал марки FB 2310; 3 – бимодал марки FB 2310; 4 – бимодал марки FB 2310; 5 – бимодал марки FB 2310; 6 – бимодал марки FB 2310

Рисунок 54 – Вариант чередования №2 «bbbbbb». а – двумерное температурное поле по толщине технологической системы, б – графики изменения температуры слоев во времени



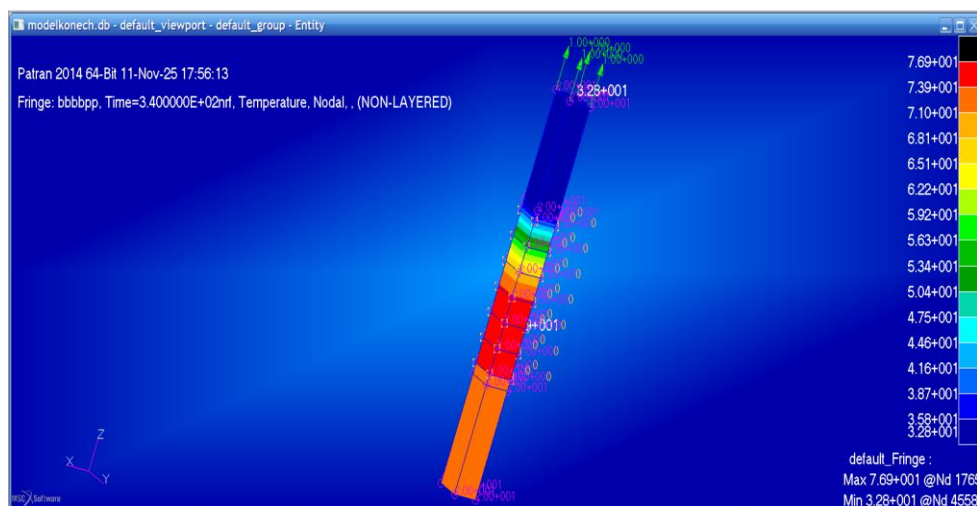
а



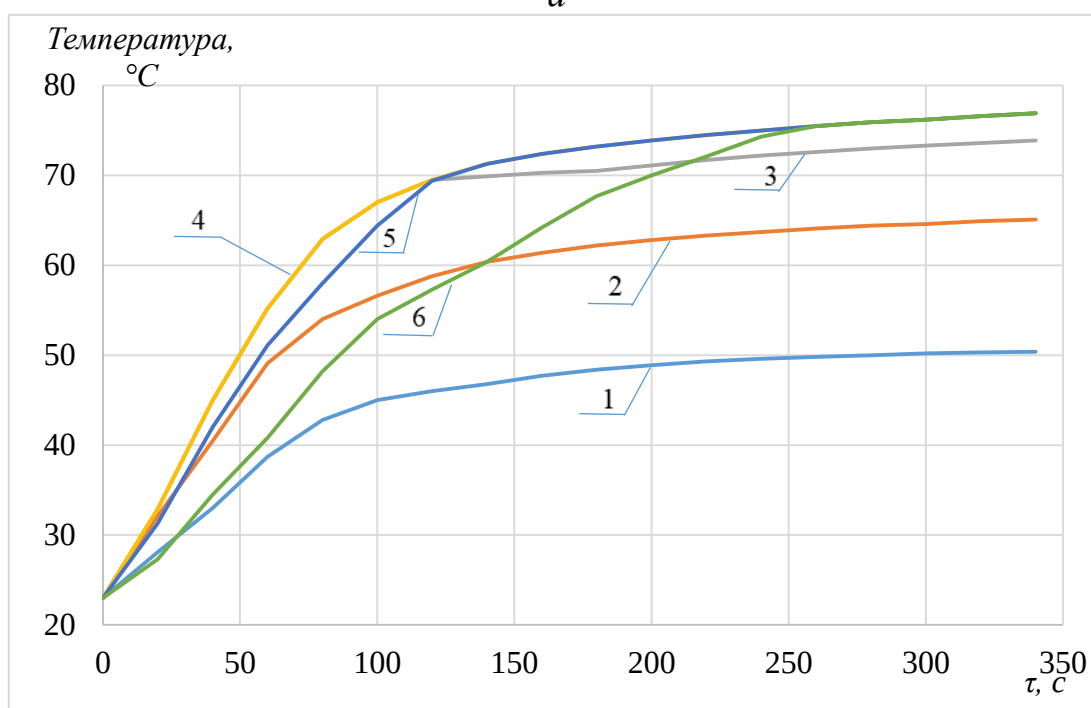
б

1 – полипропилен Н 030; 2 – полипропилен Н 030; 3 – бимодал FB 2310; 4 – бимодал FB 2310; 5 – бимодал FB 2310; 6 – бимодал FB 2310

Рисунок 55 – Вариант чередования №3 «ррbbbb». а – двумерное температурное поле по толщине технологической системы, б – графики изменения температуры слоев во времени



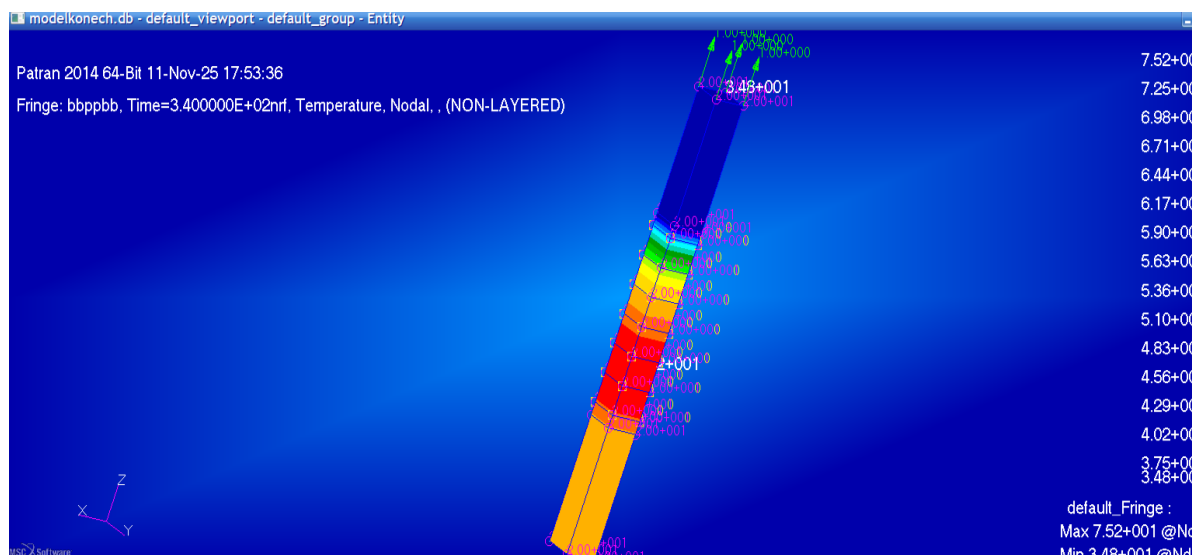
a



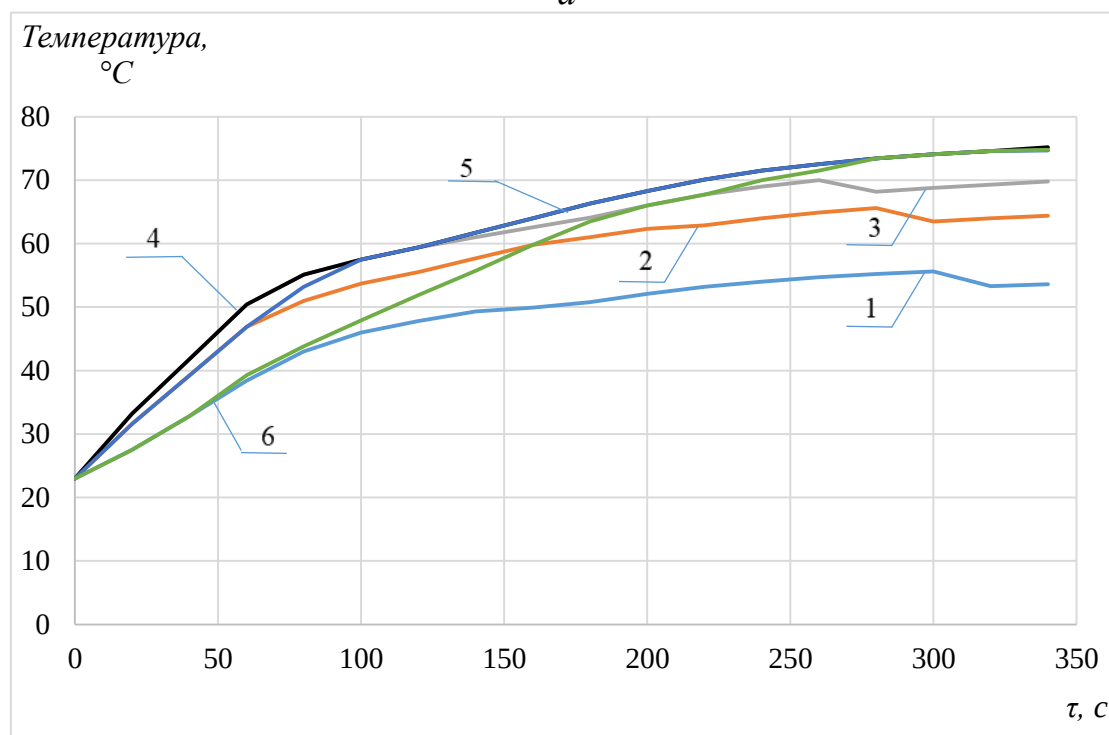
б

1 – бимодал FB 2310; 2 – бимодал FB 2310; 3 – бимодал FB 2310; 4 – бимодал FB 2310; 5 – полипропилен Н 030; 6 – полипропилен Н 030

Рисунок 56 – Вариант чередования №4 «bbbbrr». а – двумерное температурное поле по толщине технологической системы, б – графики изменения температуры слоев во времени



a



б

1 – бимодал FB 2310; 2 – бимодал FB 2310; 3 – полипропилен Н 030; 4 – полипропилен Н 030; 5 – бимодал FB 2310; 6 – бимодал FB 2310

Рисунок 57 – Вариант чередования №5 «bbprbb». а – двумерное температурное поле по толщине технологической системы, б – графики изменения температуры слоев во времени

Вариант №1 (rrrrrrr). Прогрев здесь идет очень равномерно, но медленно. К 200 секундам температура достигает 60 °C, а к 300 секундам стабилизируется в среднем на уровне 54,6 °C. Перепад между слоями составляет от 2 до 8

°C, то есть тепловой баланс довольно ровный, но общий уровень нагрева ниже, чем требуется для технологически эффективной сушки. Это объясняется низким коэффициентом диэлектрических потерь полипропилена. Такой вариант подходит только для длительного температурного выравнивания при малых мощностях, но не обеспечивает требуемой скорости нагрева в реальном производственном цикле.

Вариант №2 (bbbbb). На ранних этапах нагрева (до 80 секунд) слои 2,3,4,5 прогреваются наиболее интенсивно, их температура быстро достигает около 60 °C, тогда как верхние 1 и 6 едва выходят на 50 °C. К 300 секундам температура всей системы стабилизируется. Однако перепад между верхом и низом достигает 10-12 °C. Такой температурный градиент объясняется высокой диэлектрической активностью бимодального полимера: он выделяет значительное количество тепла, но при верхнем обдуве часть энергии уходит, и тепло распределяется неравномерно. Верхние слои перегреваются относительно нижних, создавая неустойчивый тепловой поле.

Вариант №3 (ppbbbb). В этой конфигурации нижние слои прогреваются быстрее всех, достигая 73,6 °C, тогда как верхние под обдувом остаются на уровне в среднем 62,5 °C. Температурный перепад между слоями от 2 до 10 °C. Бимодал внизу выделяет много тепла, но верхний полипропилен не способен эффективно воспринять тепловой поток и частично его рассеивает. В итоге формируется низ перегрет, верх охлажден, и равномерность нарушена. Такая схема непригодна для равномерной сушки, так как создает температурную неравномерность.

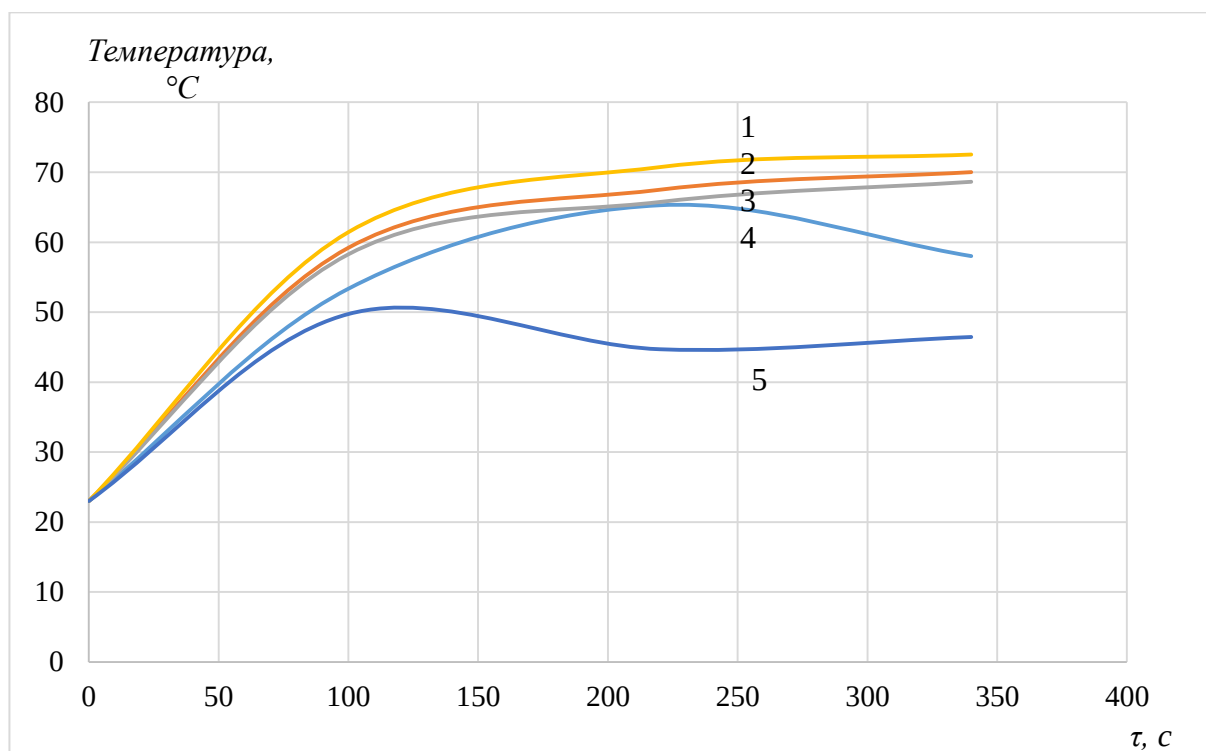
Вариант №4 (bbbbpp). Этот вариант показал наиболее равномерное и устойчивое распределение температуры. Уже через 100 секунд практически все слои прогреваются примерно до 60 °C, а к 300 секундам выходят на стабилизацию температуры, где среднее значение 69,9 °C. Разница между нижними слоями не превышает 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.

Вариант №5 (bbppbb). Здесь верхние слои, находящиеся под обдувом, прогреваются медленнее и достигают 74,6 °С, тогда как нижние слои доходят в среднем до 58,8 °С. Средняя температура всей системы составляет около 68,6 °С, а перепад 5-10 °С. Главная особенность заключается в том, что в заключительной части нагрева наблюдается снижение температуры из-за снижения электрофизических свойств бимодального полимера.

Именно поэтому данная комбинация наименее устойчивая по температуре и непригодна для основного чередования слоев, где требуется стабильный тепловой баланс. Зато подобное чередование может использоваться для предварительного кондиционирования сырья. Когда полимерная смесь поступает из холодной влажной среды, требуется мягкий, контролируемый нагрев. Это чередование создает умеренную температуру, позволяя равномерно прогреть материал перед дальнейшей обработкой.

Для проведения сравнительного анализа нагрева различно чередующихся слоев полимерных смесей интересно рассмотреть средние значения температур. На рисунке 58 представлены такие температуры для всех пяти вариантов чередования слоев полимерных смесей в процессе ВЧ-нагрева. Графики демонстрируют динамику развития средней температуры системы во времени и позволяют провести количественное сравнение энергетической эффективности каждого варианта структурирования.



1 – bbbbbbb; 2 – bbbbbpp; 3 – ppbbbb; 4 – bbppbb; 5 – pppppp

Рисунок 58 – Средние значения нагрева каждой вариации слоев полимерных смесей

Вариант №1 (pppppp) показывает наименьшую среднюю температуру — стабилизируется на уровне 54,6 °C к 300 секундам. Кривая нагрева пологая, медленная, что отражает низкие диэлектрические потери полипропилена. Этот вариант принципиально неэффективен для производственной сушки.

Вариант №2 (bbbbbb) достигает среднюю температуру около 60 °C к концу цикла. Кривая нагрева крутая на начальном этапе, что свидетельствует об интенсивном энергопоглощении бимодала. Однако неравномерность распределения (перепад 10-12 °C между слоями) создает риск локального перегрева внутренних слоев. Вариант №3 (ppbbbb) также достигает около 60-62 °C средней температуры, однако с выраженной асимметрией: нижние слои ближе к 73 °C, верхние к 62,5 °C. Такой градиент опасен для полимерных материалов, особенно при наличии влаги, так как может привести к локальной деградации.

Вариант №4 (bbbbpp) демонстрирует наиболее высокую среднюю температуру – 69,9 °C при наилучшей равномерности. Кривая нагрева стабильна, без резких колебаний, и достигает плато уже на 100-150 секундах.

Вариант №5 (bbppbb) показывает среднюю температуру 68,6 °С, что близко к варианту №4, но с заметным снижением температуры в конце цикла. Это указывает на неустойчивость теплового режима при данном расположении компонентов.

По представленному анализу вариантов чередования можно сделать следующий вывод: при реализации процесса сушки смесей полимерных материалов целесообразно использовать вариант чередования слоев №4. Обоснование этому следующее:

1. Максимальная средняя температура – 69,9 °С обеспечивает достижение требуемого уровня сушки за минимальное время. Этого достаточно для эффективного удаления остаточной влаги из гранулированных полимерных смесей при обычных условиях производства.
2. Минимальная неравномерность тепла – перепад не превышает 4 °С между крайними слоями, что гарантирует равномерную сушку по всей толщине образца без риска локальной деградации материала. Эта равномерность критична для сохранения механических и химических свойств полимеров.
3. Стабильность теплового режима – кривая нагрева монотонна, без скачков и спадов. К 100-150 секундам система выходит на рабочий режим и сохраняет его до конца цикла. Это обеспечивает воспроизводимость процесса и позволяет использовать фиксированные режимы обработки.
4. Физический механизм оптимальности – размещение четырех слоев бимодала в нижней части обеспечивает максимальное диэлектрическое нагревание, а два верхних слоя полипропилена взаимодействуют с потоком воздуха. При верхнем обдуве происходит охлаждение поверхности, но активный нагрев бимодала под ними восполняет эти потери и поддерживает температурный баланс.
5. Технологическая применимость – данная схема легко реализуется в электротермических процессах сушки с верхней системой вентиляции и позволяет обрабатывать широкий спектр полимерных композиций без перенастройки оборудования.

Варианты с ограниченным применением:

Вариант №5 (bbppbb) может использоваться в качестве предварительного кондиционирования при температурах ниже 70 °C на первом этапе обработки холодного, влажного сырья. Асимметричное нагревание позволяет медленнее прогреть материал, что предотвращает тепловой шок и вторичную конденсацию при резком повышении температуры.

Вариант №1 (pprrrrr) исключается из практического применения – энергетически неэффективен и не обеспечивает достаточного уровня нагрева за приемлемое время.

Варианты №2 и №3 непригодны вследствие выраженной неравномерности, что может привести к локальным дефектам и вариабельности качества готового продукта.

Практические следствия для производства:

Применение структуры bbbppr позволит:

1. Сократить время сушки на 40–50% в сравнении с однокомпонентным полипропиленом;
2. Обеспечить равномерность прогрева с допуском ± 2 °C;
3. Минимизировать энергопотребление за счет оптимального использования диэлектрических свойств бимодального полимера;
4. Гарантировать воспроизводимость технологических параметров в серийном производстве.

3.4 Оценка валидности математической модели

Проверка валидности модели включает в себя:

1. Оценку устойчивости модели на основе выполнения условий условия Куранта-Фридрихса-Леви;
2. Сходимость по конечно-разностной сетке;
3. Робастность при вариации параметров;

4. Проверка адекватности модели экспериментальным данным.

При решении методом конечных разностей с явной схемой по времени для всех расчетов выполнялось условие КурантаФридрихса-Леви (18):

$$\Delta\tau \leq \frac{(\Delta z)^2}{[2 \max a_i(T)]}. \quad (18)$$

Выбранные шаги $\Delta z=0,21$ мм и $\Delta\tau=0,1$ с на порядок меньше верхней границы устойчивости для всех исследованных полимеров. Отсутствие нефизичных осцилляций температурного поля (рисунки 53–57) подтверждает устойчивость.

Сходимость решения.

Последовательное измельчение сетки ($\Delta z= 0,42 - 0,21 - 0,105$ мм) показало, что уменьшение шага вдвое изменяет температуру в квазистационарном режиме не более чем на $1,5^\circ\text{C}$, а дальнейшее измельчение – менее чем на $0,6^\circ\text{C}$. Принятый шаг $0,21$ мм обеспечивает погрешность дискретизации не выше 2°C . Аналогичная проверка по времени ($\Delta\tau = 0,1 - 0,05$ с) дала расхождение менее $0,3^\circ\text{C}$, что подтверждает сходимость.

Робастность.

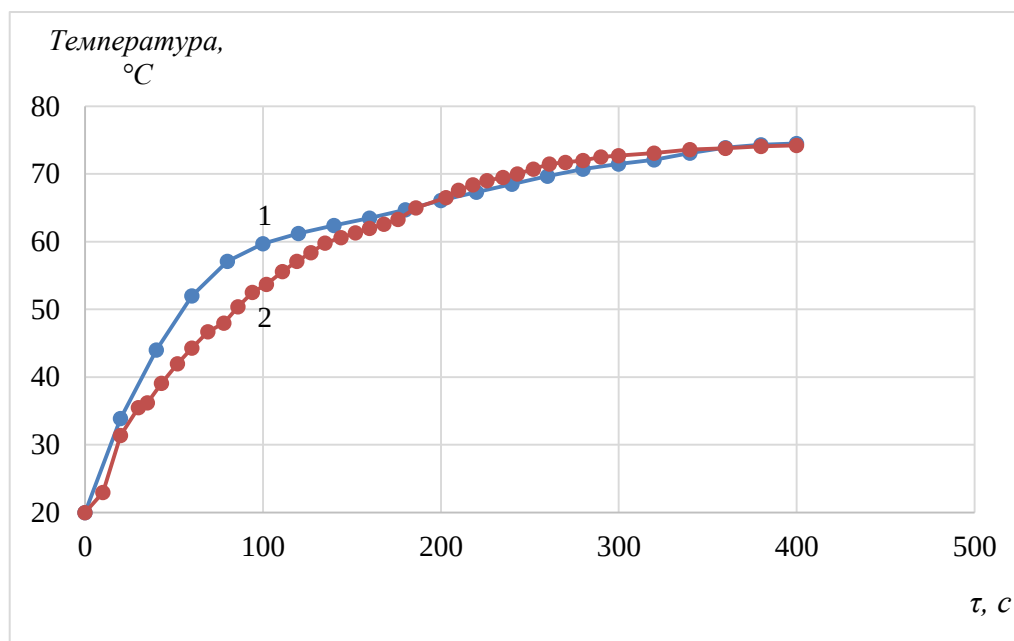
Варьирование теплофизических и электрофизических параметров в пределах $\pm 10\%$ от номинала не приводило к потере устойчивости или нефизичным выбросам, что подтверждает пригодность модели для инженерных расчетов режимов ВЧ-сушки и оптимизации структуры полимерных смесей.

Таким образом, модель является устойчивой, сходящейся и адекватной реальному процессу, что позволяет использовать ее для обоснования конфигурации технологической системы, выбора рациональных режимов и синтеза алгоритмов автоматизированной системы управления.

Адекватность экспериментальным данным.

Адекватность модели нагрева смеси полимеров подтверждается тем, что она воспроизводит как общий характер изменения температуры во времени, так и абсолютные значения температуры с малым статистическим отклонением от эксперимента. Сравнение смоделированной и экспериментальной температур-

ных кривых показало, что начальный разгон, плавный переход к установившемуся режиму и уровень конечной температуры практически совпадают, а различия носят количественно умеренный характер и не искажают физическую картину процесса нагрева и сушки.



1 – Мат. модель; 2 – Эксперимент

Рисунок 59 – График нагрева технологической смеси варианта чередования «bbbbpp»

Для количественной оценки расхождений между моделью и экспериментом (рисунок 59) были рассчитаны отклонения температуры для каждого момента времени (19):

$$\Delta T_i = T_{i\text{эксп}} - T_{i\text{мод}}, \quad (19)$$

где T – экспериментальные данные;

$T_{i\text{мод}}$ – данные модели и по ним определено среднеквадратичное отклонение по стандартной формуле (20):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta T_i)^2}. \quad (20)$$

В результате получено точное значение среднеквадратичного отклонения $\sigma = 3,4296$ °C, что характеризует средний разброс между расчетной и измерен-

ной температурой по всем точкам наблюдения. Такое значение СКО (среднеквадратичное отклонение) сопоставимо с типичными инструментальными погрешностями измерения температуры и технологическими флуктуациями в задачах теплового моделирования полимеров, что в методических рекомендациях рассматривается как допустимый уровень несоответствия для признания модели адекватной реальному процессу.

Для более наглядной оценки была определена относительная величина ошибки: в качестве характерной температуры процесса принято максимальное модельное значение, соответствующее установившемуся режиму нагрева;

Отношение (21) дает точное значение среднеквадратичного отклонения:

$$\delta_{\sigma} = \frac{\sigma}{T_{\text{харак}}} = \frac{3,4296}{74,5} = 0,0460, \quad (21)$$

Следовательно, относительное среднеквадратичное отклонение составляет 4,60 %. Такая погрешность существенно меньше 10 % и за это часто принимают в инженерной практике, как верхнюю границу для корректно настроенных тепловых моделей, и укладывается в интервал, характерный для «хорошего согласия» расчета с экспериментом при моделировании теплопереноса в полимерных системах [21, 83].

Анализ распределения отклонений по времени показывает, что на раннем участке нагрева модель несколько переоценивает скорость роста температуры, что проявляется в отрицательных значениях ΔT_i с максимальным модулем порядка нескольких градусов, однако по мере выхода на стадию квазистационарного нагрева модуль отклонений быстро уменьшается и в конце процесса не превышает десятых долей градуса; таким образом, на технологически наиболее важном, «рабочем» участке кривые практически совпадают. С учетом точного значения среднеквадратичного отклонения $\sigma=3,4296$ °C, относительной ошибки 4,60 % и качественного совпадения формы температурных зависимостей можно обоснованно заключить, что математическая модель нагрева и сушки смеси полимеров является адекватной экспериментальному процессу и пригодна для инженерного расчета и оптимизации режимов сушки.

Выводы по главе

Третья глава диссертации демонстрирует цикл постановки, разработки и верификации математической модели процесса ВЧ-нагрева многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов, ориентированной на последующую автоматизацию управления этим технологическим процессом, в том числе:

1. Предложена математическая модель высокочастотного нагрева увлажненных многокомпонентных полимерных материалов на основе системы уравнений нестационарной теплопроводности для многослойной технологической системы «электроды – теплоизоляторы – многокомпонентная смесь полимеров» с внутренними источниками тепла, отличающаяся учетом влияния коэффициента теплоотдачи;

2. Введены физически обоснованные начальные и граничные условия (третьего и четвертого рода) с учетом конвективной теплоотдачи от активной вентиляции, что обеспечивает адекватность модели реальному процессу ВЧ – сушки;

3. Коэффициенты теплоотдачи определены расчетно – экспериментальным методом по кривым охлаждения и температурным полям с использованием специализированного программного обеспечения на базе метода конечных разностей, что позволило получить температурозависимые функции $\alpha(T)$ для полимеров и их смесей.

4. На основе численного моделирования исследован процесс нагрева десятислойной технологической системы при различных вариантах чередования слоев полипропилена и бимодала; проанализированы динамика температурных полей с учетом распределения по слоям, в т.ч.: показано, что вариант структуры «ббббпр» обеспечивает максимум средней температуры при минимальной неравномерности и устойчивом тепловом режиме, формируя критерий выбора схемы чередования полимеров по слоям для ВЧ – сушки полимерных смесей.

5. Математическая модель и результаты моделирования позволяют количественно связать электрофизические свойства материалов, параметры ВЧ-поля, структуру многослойной системы и интенсивность вентиляции с динамикой изменения температуры и времени достижения температуры сушки. Тем самым сформированы предпосылки для синтеза алгоритмов управления режимами ВЧ – сушки (выбор структуры слоя, мощности, времени обработки и параметров теплоотдачи) на основе расчетных данных.

6. Проведена валидация предложенной математической модели. Модель является устойчивой, сходящейся и адекватной реальному процессу, что позволяет использовать ее для обоснования конфигурации технологической системы, выбора рациональных режимов и синтеза алгоритмов автоматизированной системы управления.

4 Автоматизация управления процессами ВЧ-обработки слабополярных и неполярных полимерных материалов

4.1 Последовательность этапов организации технологического процесса ВЧ-сушки

Результаты исследований, проведенных в предыдущих главах, позволяют укрупненно сформировать последовательность задач принятия решений при организации технологического процесса ВЧ-сушки смеси из слабополярных и неполярных полимеров. Данная последовательность представлена на рисунке 60.



$I(t)$, U_{max} , ϵ'' – динамика значений анодного тока, максимального напряжения работы ВЧ-генератора, коэффициента диэлектрических потерь соответственно

Рисунок 60 – Последовательность этапов организации технологического процесса ВЧ-сушки

4.2 Снятие зависимостей электрических параметров ВЧ-установки

Снятие зависимостей электрических параметров электротермической установки, производился с использованием промышленного оборудования УЗП-2500, на котором далее был реализован технологический процесс ВЧ-обработки.

Определение электрофизических параметров ϵ' и $tg\delta$ производится в процессе предварительной (первоначальной) ВЧ-обработки полимерного сырья и может иметь различное содержание влаги, загрязнений и т.д.

Анализ диэлектрических свойств поступающего полимерного сырья методом ВЧ-нагрева является предварительной стадией предшествующей началу технологического процесса высокочастотной сушки.

Методика проведения предусматривает размещение образцов сырья (в количестве не менее 3 экспериментов для каждой партии) между электродами рабочего конденсатора ВЧ-оборудования, кратковременное воздействие на образцы ВЧ-полем с фиксированными параметрами напряжения на обкладках рабочего конденсатора. Регистрируются время воздействия, температурный отклик, производится расчет электрофизических параметров. По результатам анализа составляется паспорт партии с указанием выявленных характеристик и рекомендуемых режимов сушки.

Процесс снятия информации показан в виде блок-схем на рисунках: 61; 62; 63 и алгоритма автоматизированной системы управления процессом определения электрофизических параметров полимеров, выбора и поддержания безопасного режима ВЧ-обработки.

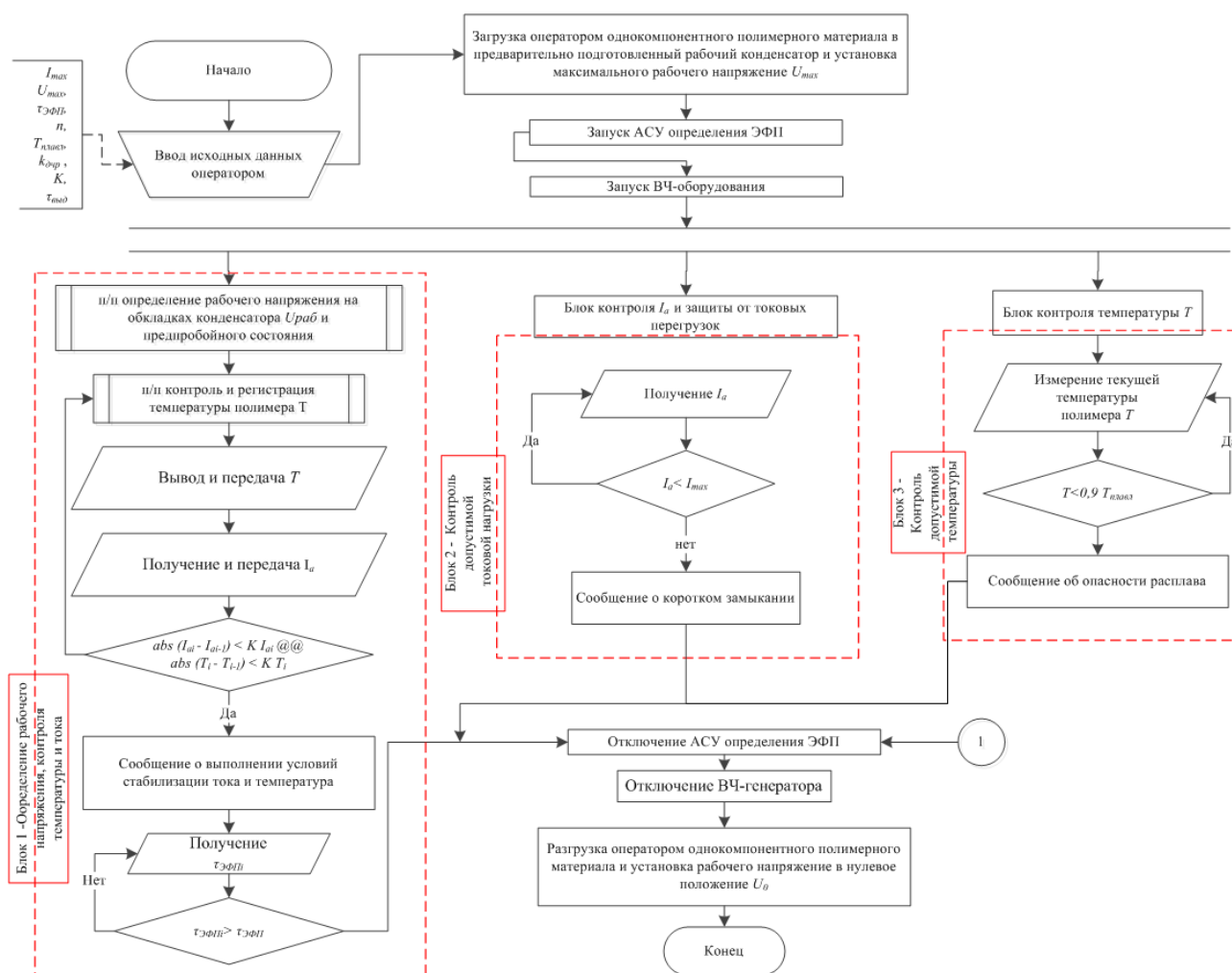
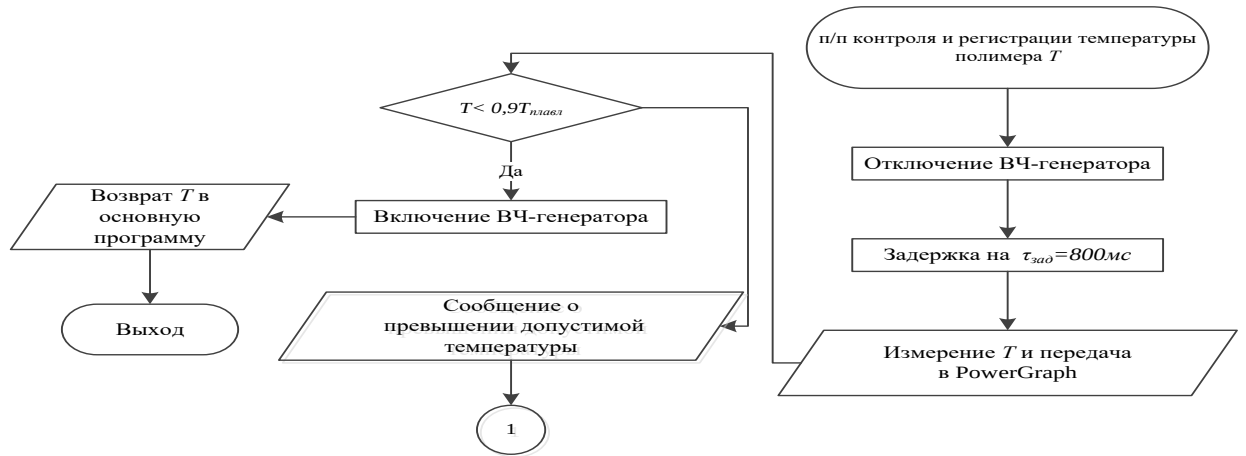
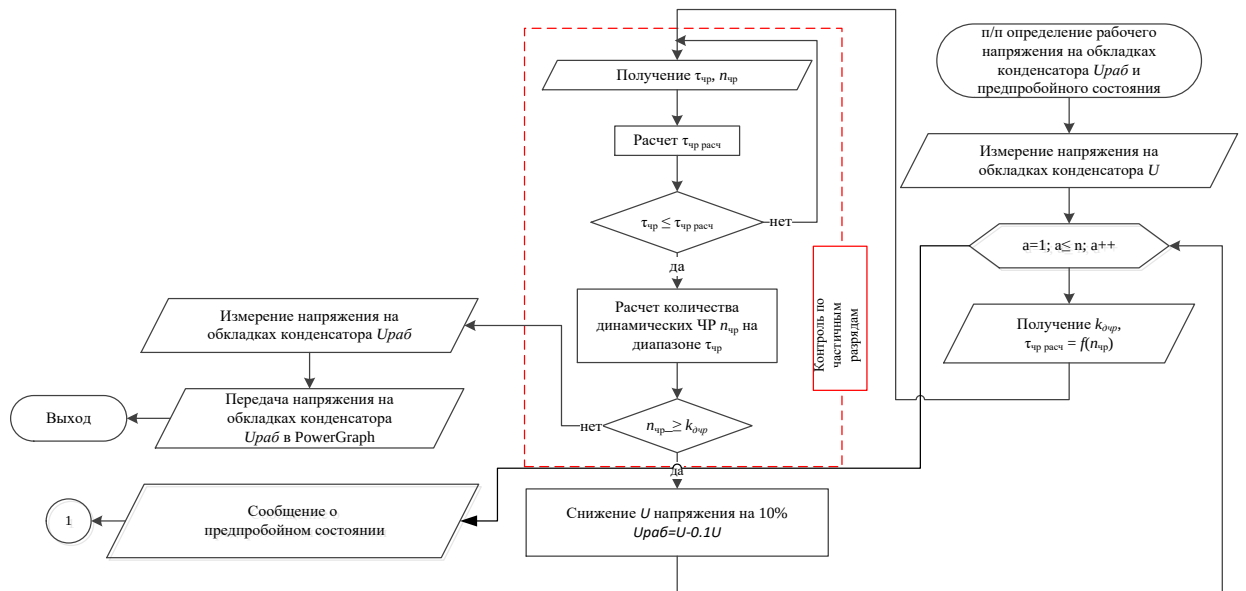


Рисунок 61 – Алгоритм определения рабочего напряжения, контроля и регистрации температуры и анодного тока

Рисунок 62 – П/П контроля и регистрации температуры полимера T Рисунок 63 – П/П определения рабочего напряжения $U_{раб}$

Алгоритм состоит из основной программы и двух подпрограмм. В начале основной программы оператор вводит исходные данные: допустимый ток I_{max} , максимальное напряжение U_{max} , требуемое время по определению электрических и физических параметров $\tau_{эфп}$, температуру плавления полимера $T_{плавл}$, коэффициент, характеризующий режим по частичным разрядам $k_{дпр}$, коэффициент K (коэффициент – уставка) и время выдержки $\tau_{выд}$. После ввода данных однокомпонентный полимер загружается в рабочий конденсатор, запускаются АСУ ЭФП и ВЧ-генератор, и далее параллельно начинают работать: блок 1 (определения рабочего напряжения $U_{раб}$ и предпробойного состояния, контроля темпе-

ратуры и тока), контрольные блоки 2 (контроль допустимой токовой нагрузки) и 3 (контроль допустимой температуры) выполняют функции защитно-регулирующих контуров, которые обеспечивают работу оборудования только в пределах допустимых значений технологических параметров и не допускают выхода за установленные значения. Одновременно в составе АСУ ЭФП непрерывно действует подпрограмма контроля частичных разрядов (представлен в п/п блока 1), заимствованная из ранее выполненных работ [22], где подробно описаны методика определения предпробойного состояния по наличию ЧР (частичных разрядов), поэтому в настоящей работе она не описывается.

В блоке определения рабочего напряжения, предпробойного состояния контроля и регистрации температуры и анодного тока включена подпрограмма определения рабочего напряжения $U_{раб}$. В этой подпрограмме сначала измеряется напряжение на обкладках конденсатора, затем выполняется логический контроль его соответствия рабочему диапазону с учетом информации от подпрограммы частичных разрядов: анализируется уровень U . При выявлении признаков предпробойного состояния (по сочетанию уровня U) формируется команда на понижение напряжения на 10% ($U_{раб} = U - 0,1U$), затем снова измеряется напряжение на обкладках, скорректированное значение $U_{раб}$ передается в систему регистрации, а в основной программе фиксируется сообщение о достижении предпробойного состояния, если n -е количество раз уменьшив $U_{раб}$ на 10%.

Блок контроля и регистрации температуры реализован отдельной подпрограммой. При ее вызове измеряется текущая температура полимера T , ВЧ-генератор временно отключается, вводится задержка $\tau_{зад} = 800$ мс, в течение которой выполняется повторное измерение температуры для более точной оценки (экспериментально было определено, что именно этого времени достаточно для точного определения температуры). Если после задержки выполняется условие $T < 0,9T_{плав}$, подпрограмма формирует команду на повторное включение ВЧ-генератора и возвращает управление в основную программу. Если же температура превышает $0,9T_{плав}$, выдается сообщение о превышении допусти-

мой температуры (опасности расплава), что является основанием для остановки процесса или его аварийного завершения.

В основной программе после работы параллельных подпрограмм выполняется вывод и передача текущих значений тока и температуры, затем проверяется условие стабилизации режима: сравниваются приращения тока и температуры между соседними измерениями, и если выполняются неравенства $|I_{ai} - I_{a(i-1)}| < K \cdot I_{ai}$ и $|T_i - T_{(i-1)}| < K \cdot T_i$, режим считается стабилизированным по току и температуре, о чем формируется соответствующее сообщение. В этот момент блок АСУ ЭФП с использованием данных постоянно работающей подпрограммы частичных разрядов вычисляет очередное приращение времени реализации электрофизических параметров $\tau_{ЭФПi}$ и добавляет его к накопленному времени $\tau_{ЭФП}$. Накопленное $\tau_{ЭФП}$ сравнивается с заданным значением; если $\tau_{ЭФП} \geq \tau_{ЭФПзад}$, формируется условие завершения работы АСУ ЭФП, если нет – цикл измерений, контроля и накопления времени повторяется.

Блок контроля допустимой токовой нагрузки реализует независимую защиту по току: измеренный ток I_a сравнивается с предельным значением I_{max} . При выполнении условия $I_a < I_{max}$ ток просто регистрируется и передается в основную программу; если же $I_a \geq I_{max}$, формируется сообщение о коротком замыкании или токовой перегрузке и процесс нагрева останавливается. Аналогично отдельный блок контроля допустимой температуры регулярно измеряет T и сравнивает ее с $0,9T_{плав}$: при превышении порога формируется сообщение о расплаве и инициируется аварийное отключение.

Завершение алгоритма происходит тогда, когда, с одной стороны, накопленное время работы по определению электрических и физических параметров $\tau_{ЭФП}$ достигло или превысило заданное значение, а с другой отсутствуют аварийные сигналы по току, напряжению и температуре. В этом случае АСУ ЭФП отключается, ВЧ-генератор выключается, итоговые массивы данных по $U_{раб}$, I_a , T и параметрам частичных разрядов за весь цикл передаются в систему регистрации, оператор разгружает полимер из рабочего конденсатора, а рабочее

напряжение устанавливается в нулевое положение U_0 , что соответствует штатному окончанию процесса нагрева и сушки.

Расчетное определение электрофизических параметров каждого полимера, входящего в состав смеси рассмотрим более подробно.

4.3 Расчетное определение электрофизических параметров каждого полимера, входящего в состав смеси

Определение электрофизических свойств диэлектрических материалов при их обработке в условиях высокочастотного (ВЧ) электромагнитного поля является сложной обратной задачей, требующей комплексного анализа экспериментальных данных [43, 49, 50,90] было реализовано с использованием методики описанной ниже.

При высокочастотном нагреве неполярных и слабополярных полимеров регистрируются четыре основных параметра: время обработки τ , температура образца T , напряжение на конденсаторе U и анодный ток I работы ВЧ-оборудования.

Методы обратных задач и параметрической идентификации широко применяются в материаловедении и позволяют определить параметры материалов по результатам экспериментов [10, 90]. Применение этих методов особенно актуально для изучения диэлектрических свойств полимеров.

При воздействии ВЧ-электромагнитного поля на диэлектрический материал возникает тепловыделение, обусловленное диэлектрическими потерями. Мощность, поглощаемая материалом, может быть описана двумя эквивалентными выражениями [72].

В соответствии с формулой (4) вычисления удельной мощности диэлектрического нагрева, мощность, затрачиваемая на нагрев определенного объема материала P_V определяется зависимостью (22):

$$P_V = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon' \cdot E^2 \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot V, \quad (22)$$

где $f = 27,12 \cdot 10^6$ Гц – частота ВЧ поля;

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная вакуума;

ε' – относительная диэлектрическая проницаемость материала;

$E = \frac{U}{d}$ – напряженность электрического поля;

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь;

$V = S \cdot d$ – объем образца материала.

С точки зрения рассматриваемых электрических параметров оборудования мощность P_V можно найти по формуле (23):

$$P_V = UI_a \cos \varphi, \quad (23)$$

где U – напряжение на конденсаторе,

V (измеряемая величина);

I_a – анодный ток, А (измеряемая величина);

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности установки (= 0,85 – 0,95).

Оба выражения (22) и (23) описывают одну и ту же мощность, поглощаемую образцом. Их использование в процессе обратного решения позволяет получить надежные оценки диэлектрических параметров [90, 72].

Процесс нагрева образца материала при одномерном распределении температуры описывается, уравнением теплопроводности с внутренним источником тепла, представленному выше (12). Оно, при условии одномерного изменения температуры (когда толщина существенно меньше его линейных размеров в плане), относительно невысоких температур разогрева может быть представлено в виде комбинации классического уравнения Ньютона-Рихмана [47] с учетом внутреннего тепловыделения (24):

$$\frac{dT}{d\tau} = a \cdot P_V - k(T - T_0), \quad (24)$$

где $a = \frac{2}{\rho S \alpha}$ – коэффициент линейности теплогенерации;

ρ – плотность материала, кг/м³;

T – температура образца, К;

$k = \frac{2a}{\rho d}$ – коэффициент охлаждения,

$C^{\circ-1}$, a – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² C°) (определяемый параметр);

T_0 – нормальная температура, C°.

Такой подход, описанный подробно в литературе [14], успешно применяется при анализе тепловых процессов в диэлектрических материалах.

Основываясь на выводах авторов, было установлено, что для неполярных полимеров в диапазоне температур ниже температуры стеклования полимеров, тангенс угла потерь меняется от температуры монотонно и эта зависимость может быть аппроксимирована полиномом второго порядка (25) [43, 29]:

$$\operatorname{tg} \delta(T) = a_0 + a_1(T - T_0) + a_2(T - T_0)^2, \quad (25)$$

где a_0, a_1, a_2 – коэффициенты полиномиальной модели (определяемые параметры);

T_0 – нормальная температура;

T – текущая температура.

Полиномиальная аппроксимация выбрана на основе следующих соображений:

1. Простота реализации при обработке экспериментальных данных.
2. Адекватность в рабочем диапазоне температур для большинства полимеров.
3. Возможность прямого применения методов линейной регрессии для определения коэффициентов.
4. Хорошее согласие с экспериментальными данными, полученными на ВЧ установках.

Предлагаемая ниже методика обратного решения основана на использовании двух независимых информационных процессах (теплого и диэлектрического) [90].

Тепловой процесс позволяет по получаемой информации о скорости изменения температуры определить теплофизические свойства полимерных ма-

териалов (a) путем интегрирования теплового уравнения и его параметрической идентификации.

Диэлектрический процесс по данным об электрических параметрах и температуре дает возможность определить диэлектрические свойства (ϵ'' , $\operatorname{tg}\delta$ (T)) путем расчета величины $\operatorname{tg}\delta$ в каждый момент времени и последующей полиномиальной регрессии.

Независимость этих каналов позволяет проверить адекватность результатов и значительно повысить надежность определения параметров.

Экспериментальные данные поступают в виде следующих зависимостей: $T(\tau)$, $I(\tau)$, $U(\tau)$.

Первичная обработка включает:

1. Исключение начальных точек: как было определено в настоящей работе 800 мс, или первые 3 – 5 отсчетов, обычно содержащие переходные процессы ВЧ-оборудования и процесса акклиматизации полимеров, исключаются из анализа.

2. Построение интерполяции: для каждого параметра строится кубический сплайн (26):

$$T(\tau) \approx S_t(\tau), U(\tau) \approx S_u(\tau), I_a(\tau) \approx S_{ia}(\tau). \quad (26)$$

3. Численное дифференцирование: производная температуры вычисляется через сплайн (27):

$$\frac{dT}{d\tau} \big|_{\tau=\tau_j} = S'_T(\tau_j), \quad (27)$$

где: $\tau_j = j\Delta\tau$ - каждый рассматриваемый момент времени при равномерной сетке с шагом $\Delta\tau$.

4. Для фильтрации шумов, возникающих при дифференцировании, применяется фильтр Савицкого-Голея с размером окна 5 и порядком полинома.

2. Этот метод хорошо зарекомендовал себя при обработке экспериментальных данных [82].

На этапе определения теплофизических параметров решается задача идентификации параметров a и k модели теплового баланса. Для этого миними-

зируется функционал невязок [90]. Минимизация проводится методом Левенберга-Марквардта» [57, 64].

По найденным значениям a и k вычисляется искомый параметр (28):

$$a = \frac{k\rho d}{2}. \quad (28)$$

Качество подгонки оценивается через коэффициент детерминации R_t^2 при условии, что $R_t^2 > 0,95$.

С целью определения диэлектрических параметров в каждой точке временного ряда рассчитывается значени $tg \delta$ (29) из баланса мощностей [72, 51]:

$$tg \delta_i = \frac{P_{V,i}}{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon' E_i^2 V}, \quad (29)$$

где: ε' принимается известной (например, из справочных данных или калибровочных измерений, проводимых с использованием предлагаемой авторами методики в рамках настоящей работы).

Для получения гладкой зависимости $tg \delta (T)$ выполняется полиномиальная регрессия второго порядка, коэффициенты которой определяются методом наименьших квадратов. Качество подгонки оценивается по коэффициенту детерминации $R_d^2 > 0,90$ [31].

Качество решения обратной задачи оценивается следующими параметрами, а именно: остаточной среднеквадратичной ошибкой (RMSE). $RMSE_t < 0,1$ °C/c, $RMSE_d < 10^{-5}$; коэффициент детерминации (R^2), приведен выше.

Предложенная модель позволяет на основе экспериментальных данных работы высокочастотного оборудования (электрических параметров) определить набор электрофизических параметров неполярных и слабополярных полимеров. Полученные электрофизические параметры полимеров можно использовать для оценки условий хранения и транспортировки материалов, расчета режимов его высокочастотной сушки.

Все компоненты модели (интерполяция, фильтрация, регрессионный анализ) реализованы на языке Python с использованием проверенных библиотек

научных вычислений. Листинг программы (Приложение А). Скрины работы программы представлены на рисунках: 64; 65; 66; 67.

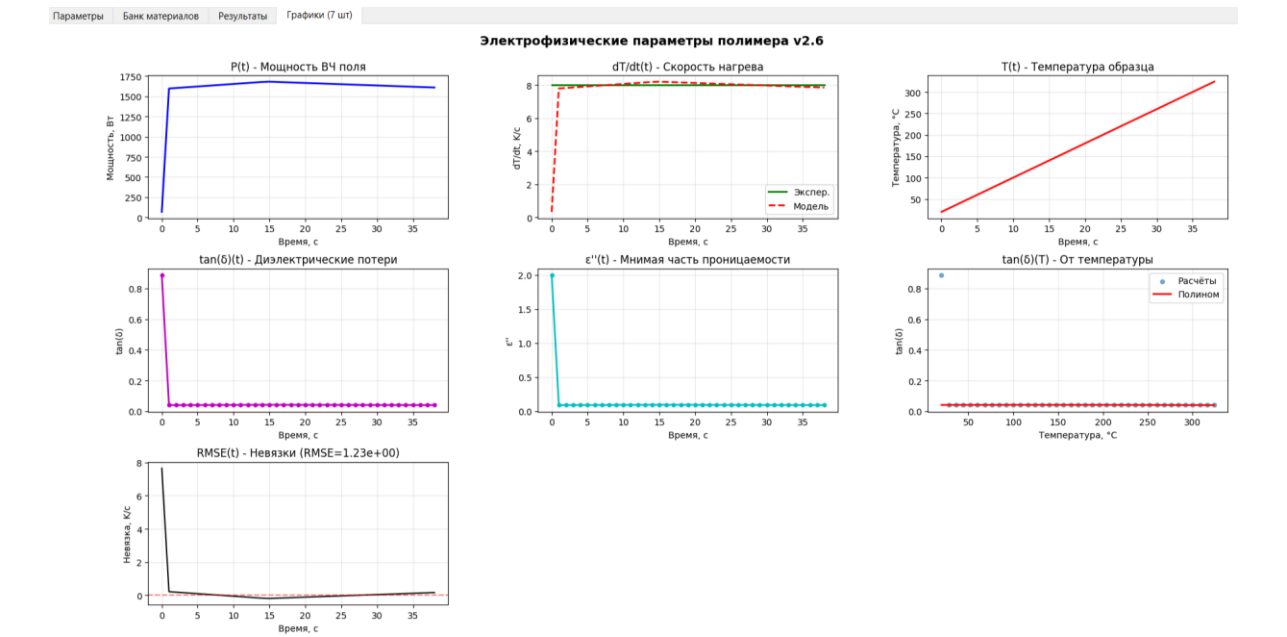


Рисунок 64 – Полученные графики электрофизических параметров полимеров

Параметры Банк материалов Результаты Графики (7 шт)				
Банк материалов:				
	Код	Название	ρ (кг/м³)	ε'
1	ПЭ	Полиэтилен	950	2.25
2	ПП	Полипропилен	910	2.25
3	ПЭТФ	Полиэтилентерефталат	1395	3.1
4	ПВХ	Поливинилхлорид	1200	3.5

Рисунок 65 – Банк полимерных материалов

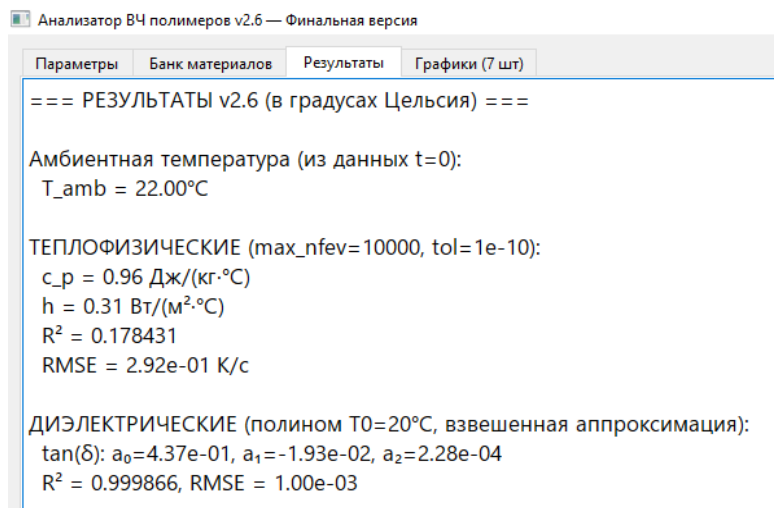


Рисунок 66 – Выходные данные

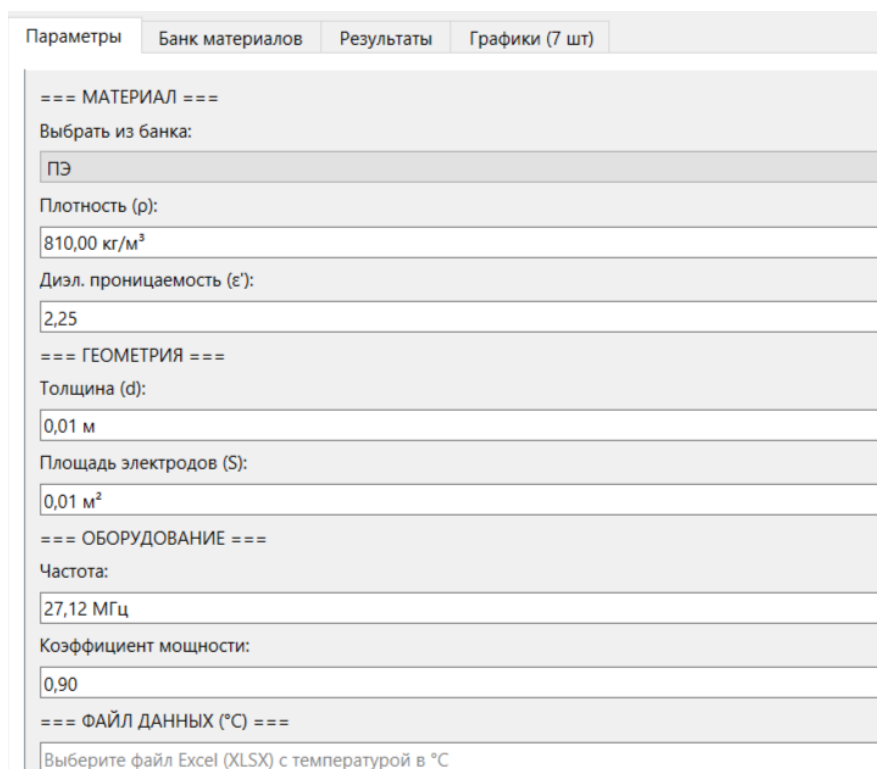


Рисунок 67 – Интерфейс программы

Результаты работы программы, сохраненные в файле формата Excel, используются как исходные данные для расчетов и условий обработки.

4.4 Определение режимов технологического процесса ВЧ-сушки полимерных материалов на основе предварительного нагрева

Определение режимов технологического процесса ВЧ-сушки полимерных материалов на основе предварительного нагрева происходит на основе одно-двухкратной опытной сушки в соответствии с рекомендациями по организации расположения слоев многокомпонентного состава слабополярных и неполярных полимеров, полученными в параграфе 0 настоящей работы с учетом изменения электрофизических параметров мокрого или влажного материала при переходе указанных параметров в область полярных полимеров.

Для заданной площади электродов S , заданной высоты между обкладками рабочего конденсатора h и максимального рабочего напряжения на обкладках ВЧ-конденсатора экспериментальным путем определяем время сушки $\tau_{\text{сушки}}$ для конечного объема материала V по стабилизации анодного тока и температуры. Учет данного времени совместно с вспомогательным временем технологического процесса сушки, затрачиваемым на загрузку/разгрузку материала, позволяет рассчитать необходимую производительность работы ВЧ-оборудования, которую можно рассчитать по следующей формуле (30):

$$П = \frac{S \cdot h \cdot P}{\tau_{\text{сушк}}} \geq П_{\text{ТР}}, \quad (30)$$

где $П$ – производительность (кг/час);

$П_{\text{ТР}}$ – требуемая производительность ВЧ-оборудования (кг/час) равная скоростью потребления полимера литьевой машиной для производства пленочных материалов.

Как направление дальнейшего совершенствования настоящей работы считаем необходимым провести разработку математической модели, алгоритма и программного обеспечения процессов расчета режимов технологического процесса ВЧ-сушки полимерных материалов по ранее полученным показателям

диэлектрических потерь $tg\delta$, ε'' и электрофизических параметров работы технологического оборудования и ВЧ-генератора.

4.4.1 Реализация технологического процесса ВЧ-сушки полимерных материалов с использованием АСУ ТП

Разработанная система управления технологическим процессом высокочастотной сушки полимерных материалов, используемых при производстве упаковочных пленок, основывается на том, что различные компоненты, входящие в состав смеси изготавливаемой продукции, могут иметь различные (меняющиеся от температуры) электрофизические параметры ε'' и различный процент содержания влаги в них $\phi\%$. В связи с этим в рамках настоящей диссертации впервые был определен комплекс контролируемых и управляемых параметров, необходимых для обеспечения организации АСУ ТП процесса ВЧ-сушки.

Комплекс контролируемых параметров в общем виде был определен в главе 2. Дополнительно необходимо отметить, что окончание основного времени процесса сушки определяется по стабилизации температуры полимерной смеси, которую целесообразно измерять в районах контакта с высоко и низкочастотными электродами T_v , T_n . Измерение температуры возможно производить при $U=0$. Повышение достоверности определения момента окончания сушки достигается за счет контроля стабилизации анодного тока. Дополнительно контроль наличия второй площадки стабилизации анодного тока позволяет определить неудовлетворительные условия хранения полимера. Дополнительно контроль предельной величины тока на рабочем конденсаторе $I_a < I_{\max}$ позволяет создать контур защиты от короткого замыкания, возможного при наличии свободной воды.

При организации технологического процесса необходимо предусмотреть следующие составляющие вспомогательного времени обработки:

- выход на постоянное напряжение обработки $\tau_{вых}$;
- выдержку после окончания основного времени обработки $\tau_{выд}$.

Напряжение на рабочем конденсаторе U должно быть стабильным $U=U_{раб}=const$. Изменение U приводит к изменению анодного тока I_a и необходимости начала нового процесса поиска площадки стабилизации. Измерение U производится косвенно по контролю угла поворота $\varphi_{нк}$ настроечного конденсатора [55] определяемого по углу поворота шагового двигателя $\varphi_{шд}$.

Дополнительный контроль частичных разрядов, возможных при ВЧ-обработке также позволяет сформировать защитный контур системы управления для организации защиты от пробойных явлений [98].

АСУ ТП работает при следующих начальных условиях, задаваемых параметрах:

- рабочее напряжение на обкладках конденсатора $U_{раб}$;
- время выдержки $\tau_{выд}$;
- расстояние H между электродами (толщина обрабатываемой смеси из n -различных полимеров с высотой h), $H = h_1 + h_2 + \dots + h_n$;
- порядок чередования слоев полимеров при построении технологической системы (таблица 8);
- площадь электродов S , м²;
- скорость воздушного потока вентилятора обдува V , м/с, определяемая опытным путем по интенсивности удаления излишек воды. Унос влаги не должен влиять на стабилизацию технологического процесса и чрезмерное охлаждение электрода. Технологическая система должна находиться в стабильном процессе массотеплопередачи.

Принимая во внимание, что у слабополярных и неполярных полимеров в процессе ВЧ-нагрева отсутствуют экстремумы анодного тока, что делает невозможным прямое использование известных схем управления [22, 65, 80, 106]. Таким образом, в рамках проведенного исследования была обоснована и разра-

ботана функциональная структура автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП).

4.4.2 Функциональная схема АСУ ТП

Функциональная схема АСУ ТП высокочастотной электротермии для сушки многокомпонентных слабополярных и неполярных материалов с двумя контурами обратной связи представлена на рисунке 68, где: ЗУ – задающее устройство, определяющее нулевое положение 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 $U_{раб}$); ИУ2 – вентилятор системы принудительной конвекции, работает в релейном режиме в состоянии ВКЛ/ВЫКЛ при $V=const$; ЧЭ₁ – чувствительный элемент в виде датчика тока (ДТ), предназначенного для организации первой из двух главных обратных связей; ЧЭ₂₁ и ЧЭ₂₂ – чувствительные элементы (датчики температуры), определяющие вторую главную обратную связь; ЧЭ₃ – чувствительный элемент в виде датчика напряжения для организации вспомогательной обратной связи выхода в рабочий режим и контроля стабильности электрофизических параметров работы ВЧ-оборудования; ЧЭ₄ – чувствительный элемент фиксации частичных разрядов для организации вспомогательной обратной связи контроля предпробойного состояния; УУ_{1...УУ₅} – устройства управления соответствующих обратных связей.

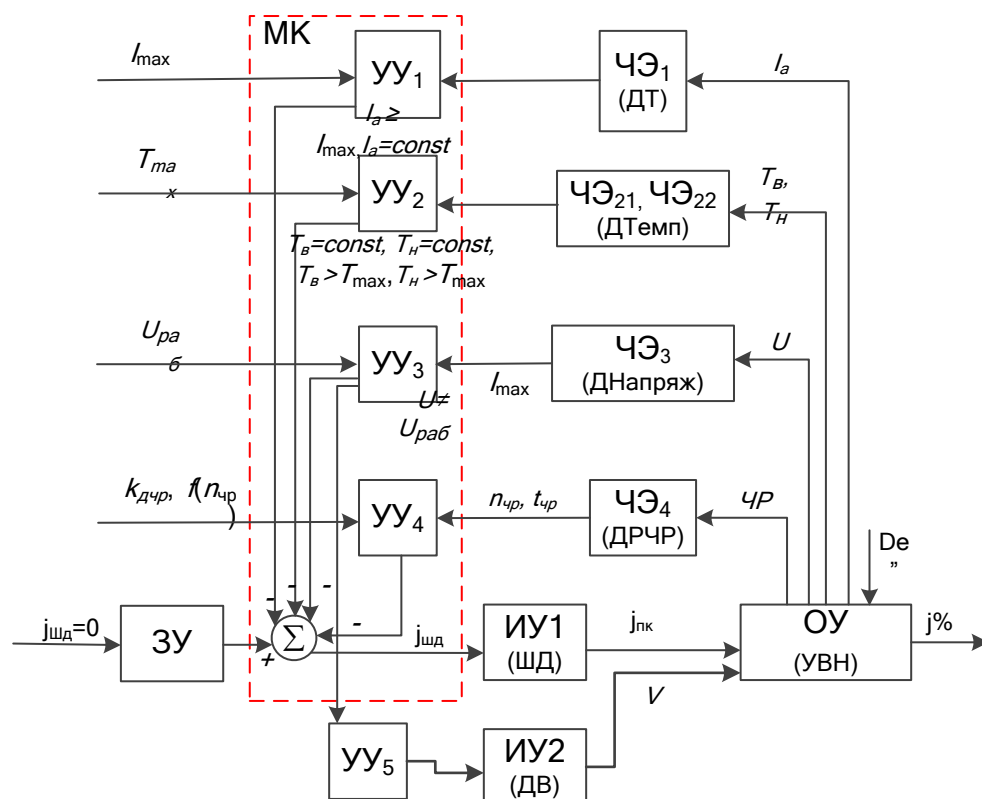


Рисунок 68 – Функциональная схема АСУ ТП

Для реализации предложенной функциональной схемы в составе АСУ ТП требуется разработка циклограммы, комплекса алгоритмического, программного и технического обеспечения.

4.4.3 Циклограмма процесса высокочастотной сушки многокомпонентных полимерных материалов

Разработанная циклограмма (рисунок 69) 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 был сформирован алгоритм функционирования АСУ ТП, описывающий логическую последовательность

обработки сигналов и формирования управляющих воздействий контроллерами контроллер1 и контроллер2 (рисунок 72) в основе которой лежит алгоритм параметрической идентификации процесса ВЧ-сушки слабополярных и неполярных полимерных материалов основные подходы к которому сформулированы в п. 2.4. Циклограмма и алгоритм функционирования АСУ ТП высокочастотной сушки многокомпонентных полимерных материалов представлены на рисунках: 69; 70; 71.

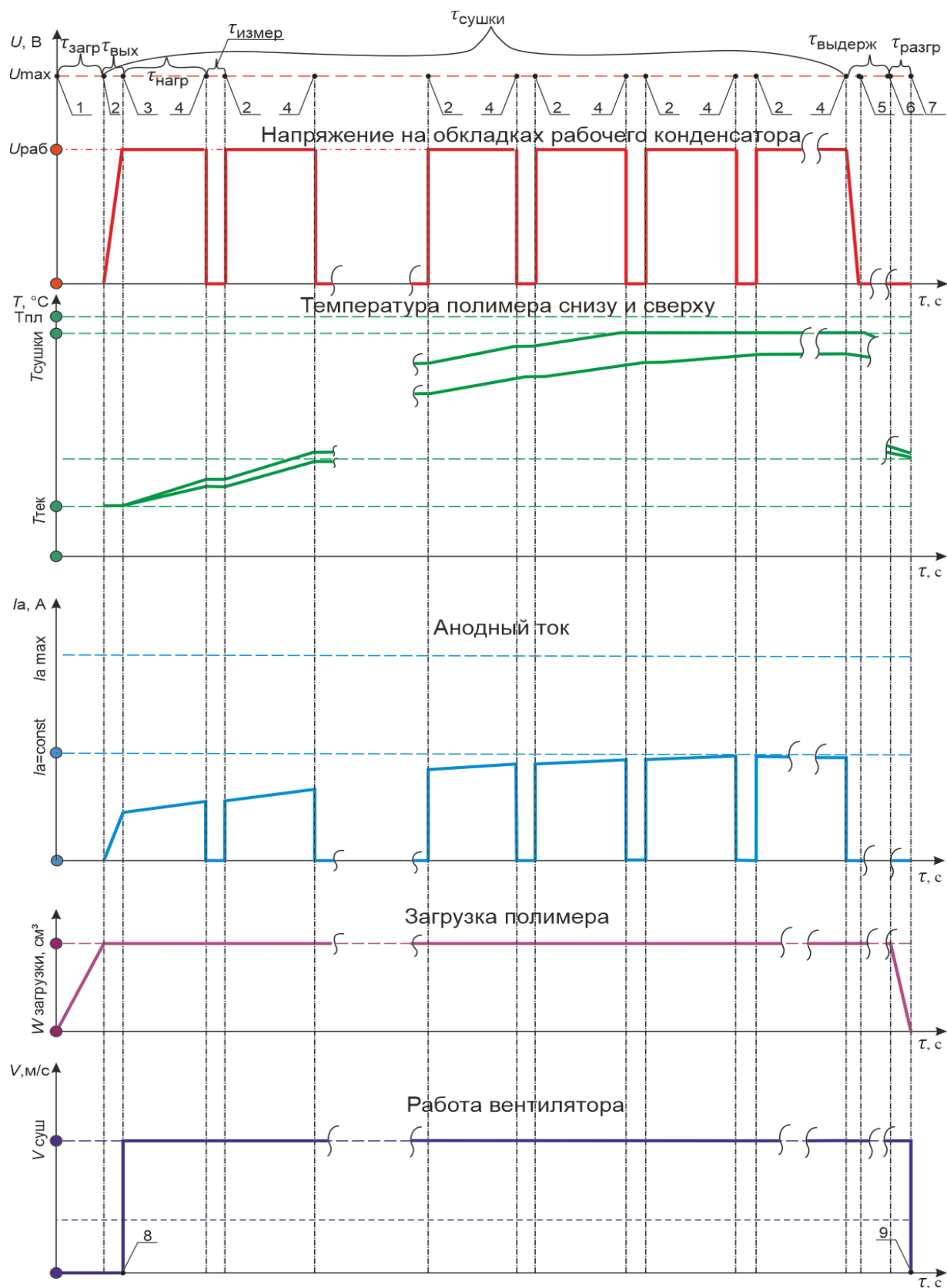


Рисунок 69 – Циклограмма процесса высокочастотной сушки многокомпонентных полимерных материалов

Из графических данных можно видеть, что процесс сушки (рисунок 69) состоит из следующих временных этапов:

1. Загрузка оборудования (время загрузки $\tau_{загр}$).
2. Выход в рабочий режим работы оборудования на напряжение $U_{раб}$ ($\tau_{вых}$).
3. Нагрев в рабочем режиме до момента измерения температуры ($\tau_{нагр}$).
4. Измерение температуры по окончании времени переходных процессов при выключении ВЧ-оборудования ($\tau_{изм}$).

Этапы 3-4 повторяются до момента стабилизации температуры сушки и анодного тока.

5. Выключение ВЧ-оборудования по достижению момента стабилизации температуры $T_{сушки}$ и анодного тока I_a и выдержка полимера для завершения электрофизических процессов электротермии ($\tau_{выдерж}$).

6. Разгрузка оборудования ($\tau_{разгр}$).

Представленная циклограмма тем самым описывает последовательность основных операций технологического процесса ВЧ-сушки и устанавливает временную взаимосвязь между изменением напряжения на рабочем конденсаторе, анодного тока, температуры полимера, степени загрузки камеры и режимом работы вентилятора. Такое формализованное представление процесса служит исходной основой для построения алгоритма функционирования АСУ ТП процесса ВЧ-сушки, определения контролируемых и регулируемых координат, а также критериев переключения между отдельными этапами цикла.

4.4.4 Алгоритм функционирования АСУ ТП процесса ВЧ-сушки

Алгоритм функционирования АСУ ТП процесса ВЧ-сушки (рисунки: 70, 71) 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 [55];
- «Защитный блок контроля допустимой токовой нагрузки»;
- «Блок включения и выключения работы ВЧ-оборудования» предназначенный для организации процесса ВЧ-нагрева и измерения температуры нагрева полимеров.

Алгоритм функционирования АСУ ТП реализован на языке C++ в составе программного обеспечения микропроцессорной системы управления. Использование языка C++ позволило организовать модульную структуру кода, разделив реализацию отдельных функциональных блоков (регуляторов, фильтров, логики защиты, интерфейсных процедур) и обеспечив их повторное использование и простоту сопровождения. Разработанное программное обеспечение гарантирует надежное и устойчивое выполнение функций автоматизированного управления технологическим процессом ВЧ-сушки, характеризуется высокой производительностью и малым временем отклика, что критично для процессов ВЧ-электротермии с быстрыми переходными процессами.

Кроме того, программный комплекс обладает широкими возможностями модификации и масштабирования при изменении структуры АСУ ТП, добавлении новых контуров регулирования или корректировке параметров технологи-

ческого процесса. Допускается адаптация алгоритма без принципиальной переработки архитектуры. Это особенно важно при работе с полимерными материалами различной природы – полярными, слабополярными и неполярными, а также при изменении их влажностного состояния, существенно влияющего на диэлектрические и тепловые характеристики в ВЧ-поле. Такая гибкость обеспечивает возможность оптимизации режимов ВЧ-сушки под конкретные композиции полимеров и расширяет область промышленного применения разработанной АСУ ТП. Разработанное программное обеспечение обеспечивает надежное и устойчивое выполнение функций автоматизированного управления технологическим процессом, характеризуется высокой производительностью и малым временем отклика, что важно для процессов ВЧ-электротермии.

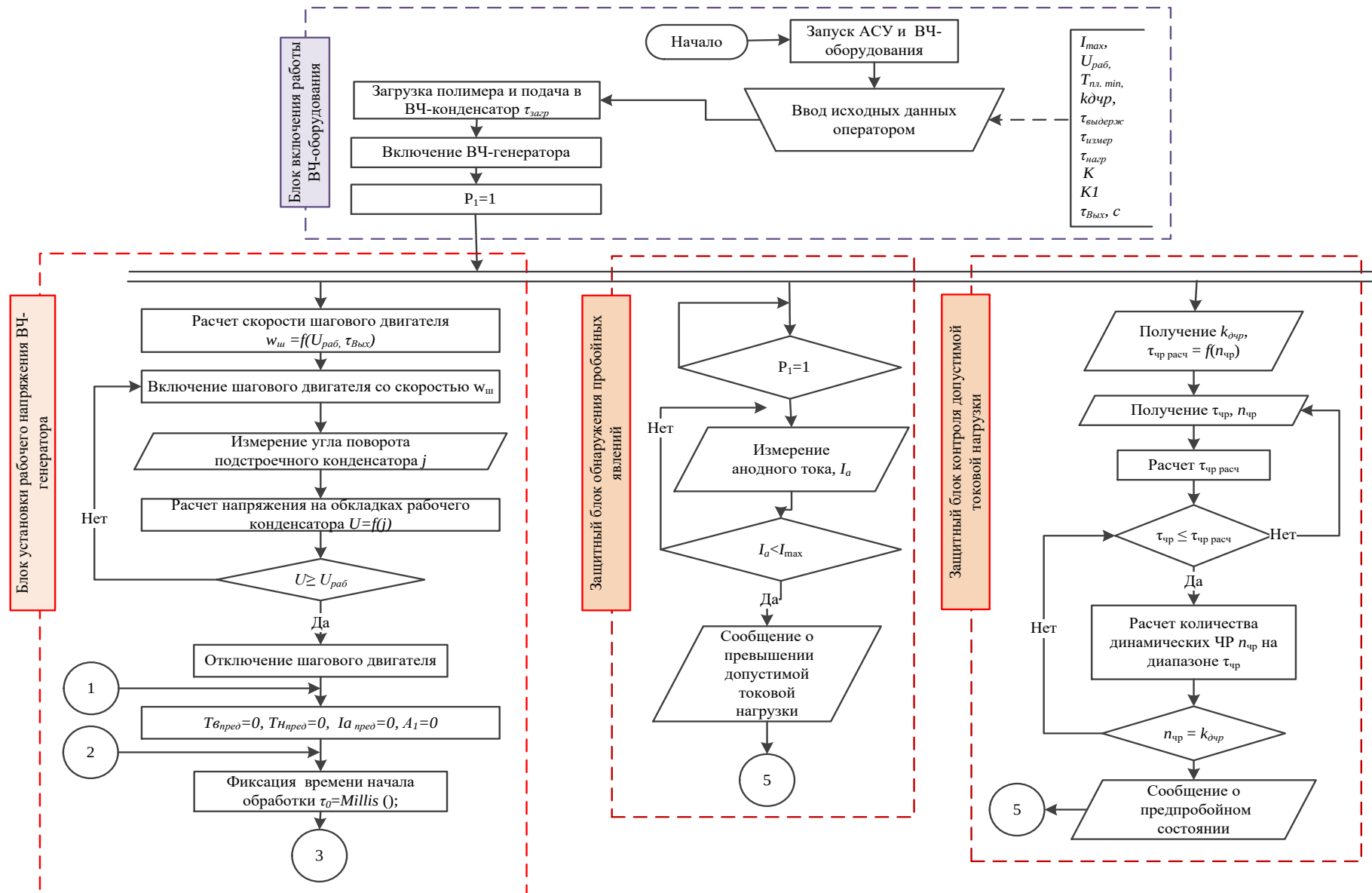


Рисунок 70 – Алгоритм АСУ ТП ВЧ-сушки

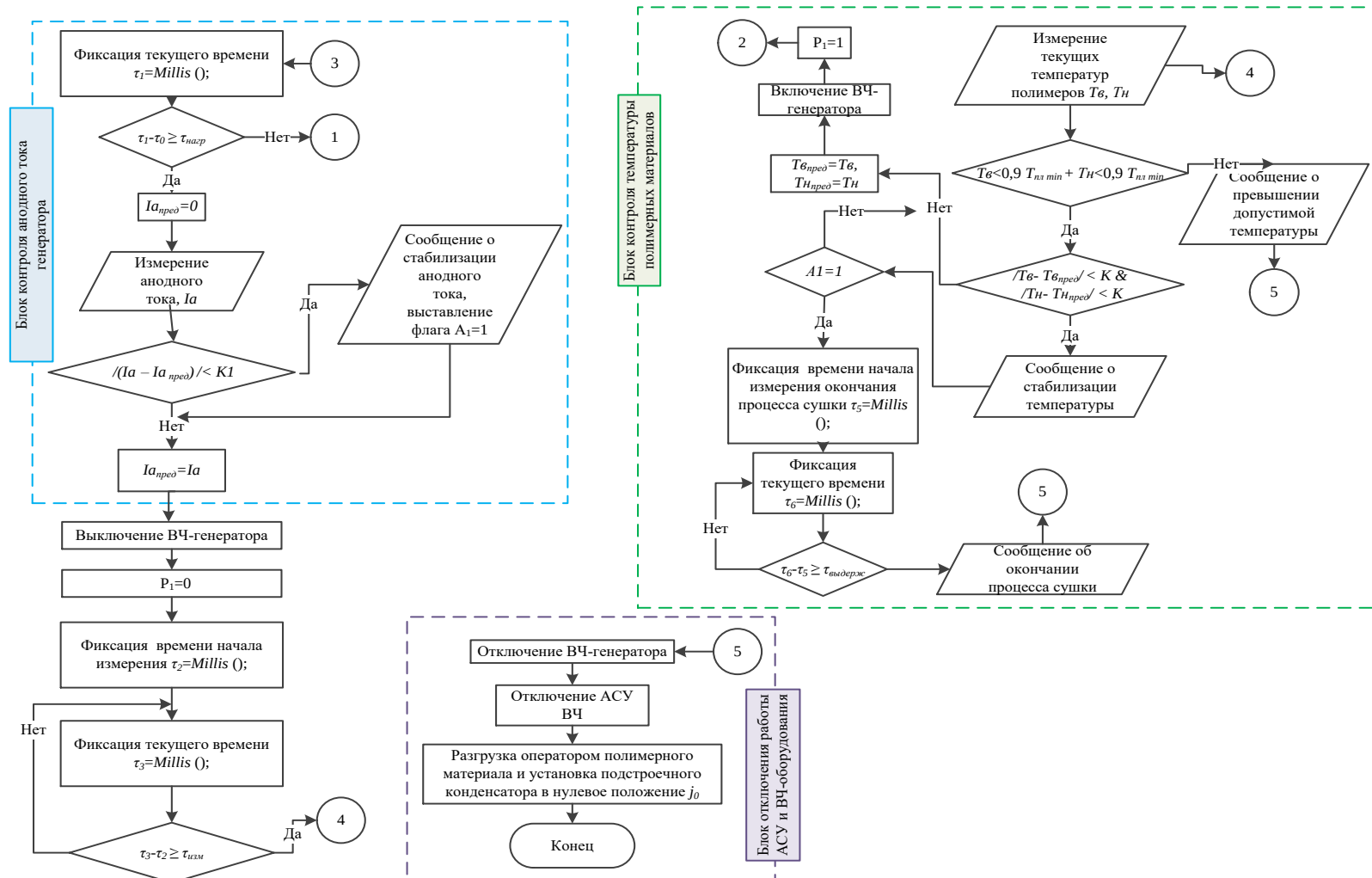


Рисунок 71 – Алгоритм ACS ТП ВЧ-сушки

4.5 Проектирование блока автоматизированной системы управления процессом высокочастотной сушки многокомпонентных полимерных материалов

Проектирование блока автоматизированной системы управления велось исходя из основных требований построения АСУ ТП, интегрируемых в существующие схемы управления промышленного оборудования. К ним можно отнести: разработка доступного и универсального устройства, собранного на базе экономически-выгодных комплектующих (желательно отечественного производства); устройство должно быть ремонтнопригодным, легковоспроизводимым; его внедрение не должно вносить значительных изменений в существующие электрические и электронные схемы управления. АСУ ТП была реализована на широко используемых существующих промышленных установках ВЧ-электротермического (диэлектрического) нагрева моделей УЗП-2500, и УЗП-6000 предназначенных для сушки многокомпонентных (слабополярных и неполярных) полимерных материалов непосредственно в производственных условиях (Приложение: Б, В, Г, Д).

Для организации выполнения процессами ВЧ-сушки полимерных материалов и управления связанными с ним операциями было решено использовать отдельные контроллер1 и контроллер2. Каждый контроллер работает по отдельному алгоритму, а их увязка произведена с помощью логического элемента «ИЛИ».

Аналогичная структура построения блока АСУ ТП успешно использовалась сотрудниками нашей научной школы [22], 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 ремонтнопригодность. Разделение по функционалу программируемые контроллеры (контроллер1 и контроллер2) и их подбор по

вычислительной мощности позволили повысить скорость, отказоустойчивость системы и снизить себестоимость блока автоматизации.

На рисунке 72 изображена функциональная схема системы автоматизированного управления процессом ВЧ-сушки полярных и неполярных многокомпонентных полимерных материалов.

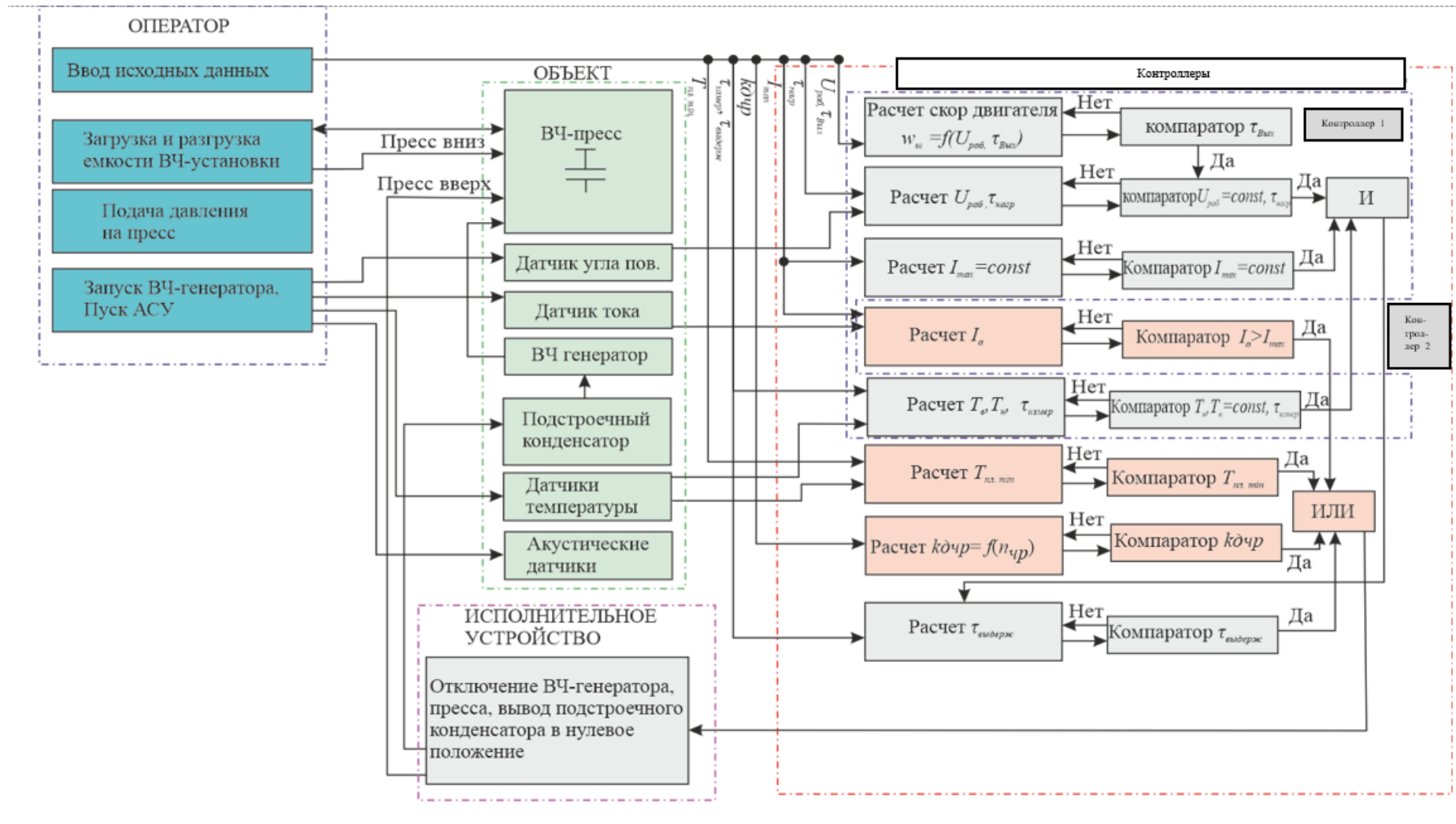


Рисунок 72 – Функциональная схема системы автоматизированного управления процессом сушки полярных и неполярных многокомпонентных полимерных материалов

4.6 Функциональная схема АСУ ТП высокочастотной сушки полимерных материалов

Система построена на базе двух микропроцессорных программируемых логических контроллеров (контроллер 1 и контроллер2) и включает четыре функциональных уровня: оператор, объект управления, микропроцессорные контроллеры и исполнительные устройства [71, 89].

Такая структура построения основана на том факте, что процессы ВЧ-электротермии скоротечны, а обрабатываемые полимерные материалы имеют малые температурные интервалы между вязкотекучим и деструктивным состоянием [13, 71, 103, 106].

Тем не менее система не может быть построена полностью автоматической. В связи с тем, что свойства полимеров значительно разнятся по своим паспортным данным из-за ряда объективных причин (влажность, предыстория производства, хранения, транспортировки и т.д.). Таким образом, АСУ ТП предусматривает ряд работ, выполняемых оператором:

- ввод исходных данных электрофизических параметров полимеров и электрических режимов работы ВЧ-оборудования (температура, время, мощность и пр.), которые передаются в контроллер через шины данных. Методики их получения изложены в параграфах настоящей работы;
- загрузка и разгрузка, в определенной последовательности по толщине, различных компонентов полимерной композиции в емкости ВЧ-установки и ее размещение между электродами рабочего конденсатора;
- подача давления на пресс, обеспечивающего надежный контакт электродов к обрабатываемому материалу.

Инициация технологического цикла начинается после запуска АСУ и генератора ВЧ-оборудования, дальнейший процесс сушки протекает автоматически, без участия оператора, что критически важно для скоростных режимов ВЧ-обработки [18, 23, 25, 30, 71].

Объект управления (центральная часть схемы) состоит из ВЧ-конденсатора (рабочий конденсатор) интегрированного с ВЧ-генератором. Исполнительными элементами системы являются шаговый двигатель, предназначенный для поворота на определенный угол настроечного конденсатора и вентилятора обдува (на схеме не указан). Рабочий конденсатор соединен с ВЧ-прессом, обеспечивающим легкое прессование (пресс вниз / пресс вверх) с целью создания надежного контакта ВЧ-электрода и полимерной смеси. Подстроечный конденсатор обеспечивает согласование контура генератора с емкостью рабочего конденсатора в ходе сушки [103]. Датчик угла поворота и его механизм заимствован из работ, подробно описываемых авторами нашей школы ВЧ-электротермии ИрГУПС [55, 98].

Датчик тока (анодного тока ВЧ-генератора) его модель и конструкция также была взята из хорошо зарекомендовавшей себя схемы АСУ ТП, разработанной коллегами нашей школы [22, 55, 58, 98].

Контроль температуры обрабатываемого материала производится на верхней и нижней границах полимера и технологической оснастки. В качестве датчиков температуры используются термисторы 10 кОм.

Система контроля с использованием акустических датчиков регистрация частичных разрядов (ЧР) методом звуколокации для контроля предпробойного состояния полимера [71] была модернизирована. У нее появилась возможность быстрой интеграции с системой контроля регистрации ЧР по количеству (функция $K_{\text{дчр}}$) значимых разрядов с частотой (16 МГц), что расширяет возможности разработанной АСУ ТП и повышает надежность ее безаварийной работы (прожоги электродов).

Ввод исходных данных: $T_{\text{пл. min}}$; T , $\tau_{\text{измер}}$; $K_{\text{дчр}}$; $\tau_{\text{выдер}}$; $I_{\text{тах}}$; $\tau_{\text{нагр}}$; $U_{\text{раб}}$. в контроллер обеспечивается шиной данных, экранированной от помех ВЧ-излучения методика защиты подробно была описана в работе [98] и реализована на промышленном предприятии.

Ядром системы являются два программируемых логических контроллера, работающих в связке. Каждый контроллер реализует набор вычислительных

модулей (блоков расчета) и блоков сравнения расчетных величин с заданными уставками (компараторов) [89, 101, 103].

Контроллер 1 осуществляет управление приводом и мощностью отвечает за верхний контур управления и включает:

- расчет скорости двигателя $w_{ш} = f(U_{раб}, \tau_{вых})$ – вычисление требуемой скорости привода пресса по рабочему напряжению и времени выхода. Результат подается на компаратор $\tau_{вых}$, который проверяет достижение заданного времени выхода. При несовпадении (выход «Нет») расчет повторяется;

- расчет $U_{раб}, \tau_{нагр}$ – определение рабочего напряжения на электродах и времени нагрева. Сравнение выполняет компаратор $U_{раб} = const$, $\tau_{нагр}$ – проверка, что напряжение и время нагрева соответствуют уставкам;

- расчет $I_{max} = const$ – определение максимально допустимого анодного тока генератора. Компаратор $I_{max} = const$ удостоверяет корректность константы.

Выходы компараторов контроллер 1 объединены логическим элементом И – все три условия (скорость, напряжение/время, ток) должны быть выполнены одновременно для перехода к следующему этапу.

Контроллер 2 реализует нижний контур управления мониторингом термических параметров и защиты от пробоя.

Прямое измерение температуры T в зоне обработки и воздействия ВЧ-поля затруднено, поэтому измерение производится при отключенном генераторе на время $\tau_{измер} = 800\text{мс}$. Компаратор $\tau_{измер}$ контролирует заданный временной интервал опроса датчиков.

Компаратор $T = const$ проверяет соответствие температуры установившемуся режиму (окончания процесса сушки) [71].

Вычисление минимальной температуры плавления полимера $T_{пл.min}$ из состава смеси является критическим параметром, определяющим границу перехода полимера в вязкотекучее состояние. Компаратор $T_{пл.min}$ контролирует, не превышение этой температуры.

Расчет $I > I_{max}$ позволяет провести сравнение текущего тока с предельным. Компаратор $I > I_{max}$ выдает сигнал при превышении допустимого тока, что является аварийной защитой от перегрузки работы генератора.

Расчет $\kappa_{дчр} = f(\ln(\tau_{чр}))$ (коэффициента динамики частичных разрядов) как функции времени возникновения ЧР является показателем предпробойного состояния полимера. Их мониторинг – это ключевой элемент защиты. Компаратор $\kappa_{дчр}$ проверяет, не превышен ли допустимый уровень разрядной активности [71].

Расчет $\tau_{выдерж}$ определяет время технологической выдержки при достигнутой температуре, а компаратор $\tau_{выдерж}$ фиксирует его окончание.

Выходы компараторов $T_{пл.мин}$ и $\kappa_{дчр}$ объединены логическим элементом ИЛИ и срабатывание любого из них является достаточным основанием для перехода к защитным действиям (отключение ВЧ-генерации или аварийная остановка).

Такая архитектура реализует итеративный подбор режимных параметров в виде системы циклического пересчитывания значений до тех пор, пока все условия не будут удовлетворены.

Нижняя часть схемы показывает блок исполнительных устройств, получающих команды от контроллера на:

- отключение ВЧ-генератора, пресса, вывода подстроечного конденсатора в нулевое положение, что относится к комплексной команде завершения штатного цикла обработки или аварийного останова. Данное действие вызывается по сигналу от контроллера 2 при достижении заданных временных и температурных параметров или при обнаружении аварийной ситуации;

- отключение ВЧ-генерации – это отдельная команда экстренного прекращения ВЧ-воздействия, активируемая при превышении I_{max} или при опасном уровне частичных разрядов.

Схема демонстрирует двунаправленную структуру управления, где:

1. Прямой поток это данные от датчиков объекта → шина данных → блоки расчета контроллера → компараторы → логические элементы → исполнительные устройства.

2. Обратная связь при несовпадении расчетных параметров с уставками (выход «Нет» компаратора) возвращает сигнал к блоку расчета для корректировки.

3. Вертикальные связи контроллер 1 и контроллер 2 соединены через общую шину данных и логические элементы И/ИЛИ обеспечивающих координацию решений.

Параметры, задаваемые оператором ($T_{пл. min}$, T , $\tau_{измер}$, $K_{дчр}$, $\tau_{выдержЖС}$, I_{max} и др.), передаются по шинам данных в соответствующие блоки контроллер и используются компараторами в качестве уставок [89].

Таким образом реализуется технологический цикл ВЧ-сушки при автоматическом управлении включающий следующие технологические операции:

- 05. Загрузка оператором полимерного материала, ввод параметров, «Пуск»;
- 10. Расчет контроллера 1 скорости привода пресса, рабочего напряжение, максимального тока;
- 15. Опускание пресса, включение ВЧ-генератора, начало диэлектрического нагрева;
- 20. Контроль контроллера 2 тока, температуры, динамику частичных разрядов и временных интервалов;
- 25. Отключение режима при достижении температуры $T_{пл. min}$, нарастании ЧР (через блок ИЛИ);
- 30. штатное завершение по истечению времени выдержки $\tau_{выдержЖС}$ состоящее из: отключения ВЧ-генератора, подъема пресса, возврата подстроечного конденсатора в нулевое положение.

Внедрение АСУ ТП на базе данной функциональной схемы позволил снизить брак при ВЧ-обработке полимеров более чем на 8% и обеспечить повторяемость результатов термообработки (с 12...2024 по 14.2025) [71].

соответствуют максимально возможной эквивалентной площади S обрабатываемой поверхности ВЧ-установки. Эти данные являются паспортными для различных промышленных установок электротермии и составляют следующие значения (таблица 9).

Таблица 9 – Паспортные данные, для различных промышленных установок электротермии

Модель оборудования	УЗП-2500	УЗП-6000	ВЧД-12000
Эквивалентная площадь S обрабатываемой поверхности, см ²	125	325	740

Работа автоматизированной установки для сушки осуществляется следующим образом.

После загрузки слоев полимерных компонентов 11, 12 производится включение АСУ ТП и настраивается цикличность работы камеры ВЧ-нагрева. Цикличность зависит от величины анодного тока I_a и напряжения $U_{раб}$ на обкладках высокопотенциального электрода, определяемых заранее. Методика и алгоритм их получения подробно описан в параграфе 4.2. Необходимо отметить, что перфорация 13 на высокопотенциальном электроде 1, который изготовлен из медного сплава, предназначена для свободного выхода продуктов сушки, удаляемых принудительно через окна 14.

Опусканию ВЧ-пресса 4 обеспечивающего подвод штока 5 на заранее определенную высоту L . Цикличность работы конвейера определяется по динамике изменения показателей анодного тока $I_a = \text{const}$, измеряемого датчиком 15 и температуры (верхнего и нижнего слоя полимерного материала) $T = \text{const}$, определяемых датчиками 19. Данные контролируемые параметры являются основными, а их стабилизация идентифицирует окончание процесса сушки. Энергия от ВЧ-генератора 10 через твердотельное реле (транзисторный выключатель) 9, регулятор напряжения $U(C)$, поворачиваемый на определенный угол α , шаговым двигателем М1 передается через коаксиальный кабель 16 и гибкую шину 8 на перфорированную пластину 1. Электротермический ВЧ-нагрев обрабатываемого материала приводит к разогреву

всего объема полимерной смеси и удалению пароводяной смеси, из обрабатываемого материала. Снятие показаний по температуре осуществляется датчиками 19, а обработка показаний температуры и тока осуществляется программируемыми контроллерами, работа которых подробно описана в параграфе 4.3. Беспрепятственный выход продуктов сушки в основном осуществляется через перфорированную пластину 1, которая после включения ВЧ-генератора выполняет роль высокопотенциального электрода и окна в крышке рабочей камеры 14. Необходимо отметить, что удаление паров осуществляется вентилятором. Отсутствие на представленных структурных и функциональных схемах вентилятора и его системы управления обусловлено стремлением избежать излишнего перегружения графического материала второстепенными элементами, не влияющими на восприятие принципиальной структуры АСУ ТП. Схема управления вентилятором является достаточно простой, а характер его работы и взаимодействия с остальными элементами системы в полной мере регламентирован разработанной циклограммой (рисунок 69), что обеспечивает возможность однозначного воспроизведения соответствующих узлов без дополнительного усложнения схемной документации.

Высота пресса L в течение всего цикла обработки не меняется, что обеспечивает надежный контакт электрода с высушиваемым материалом и постоянство напряженности электрического поля.

С точки зрения безопасности ведения работ было предусмотрено, что включению пресса предшествует обязательное опускание защитного экрана 17 с одновременным удерживанием его примагничиванием пластины 20 к включенному электромагниту Эм, который обесточивается после окончания процесса ВЧ-сушки. Открытие экрана 17 осуществляется пружинным (на установке УЗП-2500) и гидравлическим (на установке УЗП-6000) механизмом (на схеме не показаны). Поднятие экрана в верхнее положение дает также сигнал на вывод из рабочей камеры нагрева 3 уже высушенную партию многокомпонентной полимерной смеси 11, 12. В настоящее время реа-

лизована ручная загрузка-разгрузка и прорабатывается вариант автоматизации с использованием конвейерной линии.

Далее процесс повторяется.

4.7 Достижение цели диссертационной работы, обоснование эффективности разработанной АСУ ТП ВЧ-сушки многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов и ее внедрение

Целью диссертационной работы являлось повышение энергоэффективности и эксплуатационных свойств пленочных изделий из многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов за счет автоматизации управления технологическим процессом их высокочастотной (ВЧ) сушки. Достижение поставленной цели подтверждается совокупностью теоретических, экспериментальных и прикладных результатов, полученных в ходе выполнения диссертационного исследования, а также данными промышленного внедрения разработанной автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) на предприятии ООО «ТД ЗПМ» (г. Ангарск).

В представленной четвертой главе диссертации последовательно решены все задачи, необходимые для реализации автоматизированного управления ВЧ-сушкой, что позволило создать замкнутый цикл: от идентификации состояния сырья до формирования управляющих воздействий, обеспечивающих стабильное качество готовой пленочной продукции.

На основе экспериментальных исследований (глава 2, п. 2.4, рис. 43, 44) установлено, что основными контролируемыми параметрами, однозначно характеризующими степень увлажненности и динамику сушки многокомпонентных смесей, являются: стабилизация анодного тока I_a ВЧ-генератора, температуры верхней T_v и нижней T_n поверхностей полимерного массива при постоянном рабочем напряжении $U_{раб}$ на конденсаторе. Предложенный в п. 4.1 (рисунок 58) алгоритм последовательности задач принятия решений, а также

разработанные подпрограммы определения рабочего напряжения (п. 4.2, рисунок 63) и контроля температуры (рисунок 62) позволили перевести процесс из категории субъективно-ручной в категорию автоматически идентифицируемую.

С помощью численного моделирования (п. 3.3, табл. 7, рисунок 53–58) обоснована оптимальная структура чередования слоев «bbbbrr» (четыре слоя бимодала внизу, два слоя полипропилена вверху), обеспечивающая максимальную среднюю температуру прогрева ($69,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), минимальный перепад по толщине (не более $4\text{ }^{\circ}\text{C}$) и устойчивый тепловой режим. Именно эта конфигурация была реализована в промышленной АСУ ТП, что гарантирует равномерность сушки и предотвращает локальную деструкцию полимеров.

Предложенная архитектура АСУ ТП для слабополярных и неполярных смесей реализует адаптивный итеративный подбор режимов с критерием одновременной стабилизации температуры и анодного тока, что полностью исключает субъективный фактор и обеспечивает воспроизводимость свойств готовой пленки.

Анализ, выполненный в п. 1.3 диссертации, показывает, что конвективная сушка характеризуется низкими коэффициентами теплоотдачи ($11,6\text{--}23,2\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$), значительной продолжительностью процесса (до $5\text{--}17$ часов для достижения остаточной влажности $4,5\text{--}5\%$ по массе) и неизбежным градиентом температуры (поверхность перегрета, внутренние слои остаются влажными). В противоположность этому, реализуемая высокочастотная сушка обеспечивает объемный диэлектрический нагрев, при котором тепловыделение происходит одновременно во всем объеме материала (формула (4), п. 1.4), что позволяет сократить длительность процесса до единиц минут (рисунок 45, 46). Благодаря автоматизированному управлению (разработанная АСУ ТП) процесс ведется в оптимальном режиме – при напряжении $U_{\text{раб}}$, обеспечивающем максимальную удельную мощность потерь без пробоя, и с принудительной вентиляцией, исключающей вторичную конденсацию. Как показано в аналитическом обзоре (глава 1, п. 1.3), конвективная сушка полимеров характеризуется низкими ко-

эффицентами теплоотдачи ($11,6\text{--}23,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$), существенной продолжительностью процесса (до 5–17 часов для достижения остаточной влажности 4,5–5%), а также неравномерностью прогрева (градиент температуры от поверхности к центру), что нередко приводит к термической деструкции поверхностных слоев при недосушенных внутренних. При этом в силу малой теплопроводности полимеров (для полипропилена $\lambda \approx 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) конвективный способ требует значительных затрат электроэнергии на нагрев большого объема сушильного агента и длительной его циркуляции.

В противоположность этому, высокочастотная сушка, основанная на объемном диэлектрическом нагреве (формула (4), п. 1.4), обеспечивает практически безынерционное тепловыделение непосредственно в объеме материала. Благодаря автоматизированному управлению процессом (разработанная АСУ ТП) время выхода на режим и длительность самой сушки сокращаются до нескольких минут (экспериментальные данные, п. 2.4, рисунок 45, 46 – для образцов бимодала FB2310 процесс завершается за 250–300 секунд). При этом энергия ВЧ-поля расходуется только на нагрев полимерной композиции, а не на нагрев воздуха или оснастки.

Подтверждением энергоэффективности служит сам факт промышленного внедрения АСУ ТП. Замена конвективных сушилок (которые ранее использовались на предприятии для предварительной подготовки сырья) на ВЧ-сушку позволила, согласно акту внедрения, снизить общие производственные затраты на 970 347 руб. в год, что включает, в том числе, экономию электроэнергии. Прямое разделение экономического эффекта на энергетическую и технологическую составляющие в акте не приведено, однако общеизвестно, что при равной производительности (750 кг/смену) ВЧ-сушка требует на порядок меньшей установленной мощности и времени работы, что однозначно свидетельствует о ее более высокой энергоэффективности по сравнению с конвективными аналогами. В акте внедрения напрямую отмечено снижение общих энергетических затрат на операцию подготовки сырья.

Промышленное внедрение подтвердило достижение цели – повышение энергоэффективности обработки сырья и эксплуатационных свойств пленочных изделий.

Как следует из акта внедрения (Приложение Е), разработанная АСУ ТП ВЧ-сушки многокомпонентных слабополярных и неполярных полимерных материалов была интегрирована в действующую технологическую линию производства упаковочной пленки (арт. 31-2, 23-1, 14-2 толщиной 0,5; 0,4 и 0,25 мм по ГОСТ 10354-82). В результате внедрения:

- объем поступающей рекламации на продукцию снижен на 8%, что напрямую свидетельствует о повышении эксплуатационной надежности (срока стойкости) упаковочного материала при транспортировке и хранении;
- доля брака сокращена до 2% (с исходного уровня, превышавшего нормативный);
- производительность процесса сушки увеличена на 7% за счет сокращения простоев и исключения повторных циклов;
- годовой экономический эффект составил 970 347 руб.

Эти показатели являются прямым количественным подтверждением того, что автоматизация управления технологическим процессом ВЧ-сушки обеспечила повышение качества и эксплуатационных свойств пленочных изделий – снижение дефектности, повышение прочности и долговечности упаковочной пленки, стабильность характеристик от партии к партии.

Теоретические и экспериментальные результаты, полученные в диссертации, создали научно-методическую базу для достижения цели. Без разработанного в главе 2 модуля АСНИ ЭФП, позволившего получить зависимости $\varepsilon'(T, \varphi)$ и $tg\delta(T, \varphi)$ для полипропилена Н030 и бимодала FB2310, без математической модели главы 3, обосновавшей оптимальную структуру «bbbbrp», и без алгоритмов параметрической идентификации (п. 4.3) было бы невозможно корректно настроить АСУ ТП. Именно комплексное использование этих результатов обеспечило переход от эмпирически-ручного к научно обоснованному автоматизированному управлению.

Таким образом, совокупность полученных в диссертации результатов – от фундаментальных исследований электрофизических параметров и создания адекватной математической модели до разработки, внедрения и промышленной эксплуатации АСУ ТП ВЧ-сушки – полностью соответствует поставленной цели.

Выводы по главе

Четвертая глава диссертации посвящена разработке и реализации автоматизированной системы управления (АСУ) процессами ВЧ-обработки слабополярных и неполярных полимерных материалов, интегрирующей результаты идентификации объекта, математического моделирования и параметрической идентификации для обеспечения технологической воспроизводимости и безопасности процесса.

1. Сформирована укрупненная последовательность этапов организации технологического процесса ВЧ-сушки: от предварительного диэлектрического анализа поступающей партии сырья до расчета электрофизических параметров (ε' , $\operatorname{tg}\delta$, добротность Q) и выбора безопасных режимов обработки с учетом текущего состояния материала (влажность, загрязнения).

2. Разработан многоуровневый алгоритм АСУ ЭФП с основной программой и подпрограммами (определение рабочего напряжения $U_{\text{раб}}$, контроль частичных разрядов, стабилизации режима, защиты по току I_{max} и температуре $0,9 T_{\text{плав}}$), обеспечивающий непрерывный мониторинг параметров ВЧ-генератора (U , I_a , T) и аварийное отключение при превышении порогов.

3. Предложен и реализован метод решения обратной задачи определения электрофизических параметров полимеров по экспериментальным данным промышленного оборудования (УЗП-2500): баланс мощностей диэлектрического нагрева ($P_{\text{диэл}}=P_{\text{эл}}$) с использованием уравнения теплопроводности Ньютона-Рихмана и полиномиальной аппроксимации $\operatorname{tg}\delta(T)$.

4. Обеспечена надежность идентификации за счет независимого анализа теплового (идентификация теплофизических параметров) и электрического (расчет ε'' по балансу мощностей) каналов информации.

5. Разработано программное обеспечение на Python для автоматизированной обработки экспериментальных данных ($T(t)$, $I(t)$), создания паспортов партий полимерного сырья и формирования банка материалов с электрофизическими характеристиками, что обеспечивает воспроизводимость режимов ВЧ-обработки для различных составов смесей.

6. Разработан алгоритм параметрической идентификации процесса ВЧ-сушки слабополярных и неполярных полимерных материалов с защитно-регулирующими контурами, обеспечивающими переход от ручной к автоматизированной высокочастотной сушке полимерных смесей, повышая технологическую воспроизводимость, безопасность и эффективность производства упаковочных материалов.

7. Создана АСУ ТП высокочастотной сушки слабополярных и неполярных полимерных материалов, реализующая вышеуказанный алгоритм.

8. Проанализировано достижение цели диссертационной работы.

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 $\operatorname{tg} \delta(T, \rho)$ 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_a , температуры нижней и верхней поверхностей обрабатываемого полимерного массива T_n , T_v после выхода на максимальное энергетическое воз-

действие, напряжение рабочего конденсатора $U_{раб}$ высокочастотного оборудования, количество частичных разрядов $n_{чр}$.

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' , $tg\delta$, 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Inner.su. Свойства ВОРР: прозрачность 91–95 %, прочность 110–280 МПа, модуль упругости [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://inner.su/articles/tablitsy-svoystv-upakovochnykh-plenok-ldpe-hdpe-pp-pet-pa-evoh-pvdc-dlya-upakovki/> (дата обращения: 16.03.2026).
2. MSC Nastran – расчет и оптимизация конструкций [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.mscsoftware.ru/products/msc-nastran> (дата обращения: 16.03.2026).
3. OECD. Глобальный обзор пластмасс: экономические факторы, экологическое воздействие и варианты политики. – OECD Publishing, 2022.
4. Plastics Europe. Plastics – the Facts 2023: An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data. – Brussels : Plastics Europe, 2023.
5. Plastics.com.ru. Барьерная пленка: PET/AlO_x/PE, BOPET/EVOH/PP [Электронный ресурс]. – URL: <https://plastics.com.ru/packing/products/barrier/> (дата обращения: 16.03.2026).
6. PlasticsEurope. Пластмассы – факты 2019: анализ европейского производства пластмасс, спроса и отходов. – PlasticsEurope, 2019. – 40 с.
7. Обзор мировой полимерной индустрии // Poly&Pro – сообщество специалистов полимерной отрасли [Электронный ресурс]. – URL: https://polyprofi.ru/blogs/Blog_Poly_and_Pro/obzor-mirovoy-polimernoy-industrii.php (дата обращения: 16.03.2026).
8. Rosspolimer.ru. HD80520 FE – бимодальный полиэтилен высокой плотности для пленок с высокой прочностью и органолептикой [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: https://rospolimer.ru/produktsiya/catalog_ps/pnd/plenochnye-marki/hd80520-fe-bimodalnyj-polietilen-vysokoj-plotnosti/ (дата обращения: 16.03.2026).

9. Yarus-market.ru. Прозрачная BOPP-пленка 15–40 мкм: термосвариваемость, устойчивость к УФ [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: https://yarus-market.ru/gibkaya_upakovka/polipropilenovye-plenki/plenka-bopp-prozrachnaja (дата обращения: 16.03.2026).
10. Адамар, Ж. Задача Коши в линейных уравнениях в частных производных / Ж. Адамар. – М. : Наука, 1978. – 352 с.
11. Александров, А. А. Моделирование термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Александров. – 2016. – 20 с.
12. Аналитический центр ТЭК. Состояние российской индустрии пластмасс в 2024 г. – Казань : АЦ ТЭК, 2025.
13. Арш, Э. И. Автогенераторные методы и средства измерения / Э. И. Арш. – М. : Машиностроение, 1979. – 256 с.
14. Асеева, Р. М. Влияние окружающей среды на свойства полимеров / Р. М. Асеева, Г. Е. Зайков. – Утрехт : VSP, 2000. – 380 с.
15. Атрибуты конечных элементов и построение сетки [Электронный ресурс]. – URL: <http://mylektsii.ru/2-67109.html> (дата обращения: 16.03.2026).
16. Базарова, Ф. Ф. Органические и неорганические полимеры в конструкциях радиоэлектронной аппаратуры / Ф. Ф. Базарова. – М. : Сов. радио, 1974. – 160 с.
17. Берлинер, М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1973. – 400 с.
18. Берлинер, М. А. Автоматическое управление процессами сушки / М. А. Берлинер // Автоматизация процессов сушки в промышленности и сельском хозяйстве. – М. : Машгиз, 1963. – С. 8–22.
19. Бондарев, В. В. Физико-химическое влияние жидких сред на механические свойства полиэтилена и полипропилена : дис. ... канд. хим. наук / В. В. Бондарев. – М., 2001. – URL: <https://elibrary.rsl.ru> (дата обращения: 16.03.2026).

20. Бортников, В. Т. Основы технологии переработки пластических масс / В. Т. Бортников. – Л. : Химия, 1983. – 303 с.
21. Буторин, Д. В. Разработка математической модели тепловых процессов высокочастотной обработки полимерных материалов / Д. В. Буторин // Вестник Воронежского ГТУ. – 2020.
22. Буторин, Д. В. Автоматизация управления процессами высокочастотной обработки полимерных материалов разной степени полярности : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. В. Буторин. – Красноярск : Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, 2018. – 20 с.
23. Буторин, Д. В. Автоматизация измерения температуры полимерного материала при высокочастотном электротермическом нагреве / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 1 (53). – С. 96–103.
24. Буторин, Д. В. Автоматизация контроля структурных превращений в полимерных материалах при электротермической обработке / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, С. Н. Филатова, А. В. Лившиц, С. К. Каргапольцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 1 (49). – С. 117–125.
25. Буторин, Д. В. Автоматизация процесса контроля фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц // Информационные системы и технологии. – 2017. – № 1 (99). – С. 44–53.
26. Буторин, Д. В. Комплексированный метод автоматизированного высокочастотного контроля фазовых превращений в полимерных материалах / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2016. – № 10. – С. 10–18.
27. Влажность полимеров при литье под давлением // Poly&Pro [Электронный ресурс]. – URL: https://polyprofi.ru/blogs/Blog_Yuri_Petrovich_Lozhechko/vlazhnost-polimerov-pri-

lite-pod-davleniem.php?ysclid=mn2svwh684712374993 (дата обращения: 16.03.2026).

28. Влияние влажностного состояния на изменение свойств полимерных материалов // CyberLeninka [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-vlazhnostnogo-sostoyaniya-na-izmenenie-svoystv-polimernyh-materialov> (дата обращения: 16.03.2026).

29. Гаврилиак, С. Диэлектрическая и механическая релаксация в материалах / С. Гаврилиак, С. Негами // Научный журнал полимерных наук. Часть С. – 1966. – Т. 14, № 1. – С. 99–117.

30. Гареев, Ф. Х. Сушка древесины электромагнитными волнами / Ф. Х. Гареев // ЛесПромИнформ. – 2004. – № 9 (22). – С. 74–78.

31. Гаусс, К. Ф. Теория движения небесных тел, обращающихся вокруг Солнца по коническим сечениям / К. Ф. Гаусс. – Гамбург : Perthes, 1809. – 227 с.

32. Глуханов, Н. П. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов в машиностроении / Н. П. Глуханов, И. Г. Федорова. – Л. : Машиностроение, 1983. – 160 с.

33. ГОСТ 12423–2013. Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов. – М. : Стандартинформ, 2014. – 7 с.

34. ГОСТ 16337–77. Полиэтилен высокого давления. Технические условия. – М. : Издательство стандартов, 1977.

35. ГОСТ 16338–85. Полиэтилен низкого давления. Технические условия. – М. : Издательство стандартов, 1985.

36. ГОСТ 22372–77. Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. – М. : Издательство стандартов, 1977.

37. ГОСТ 29244–91. Небольшие контейнеры для кондиционирования и испытания с использованием водных растворов для поддержания постоянного значения относительной влажности. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2003.

38. ГОСТ 4650–73. Пластмассы. Методы определения водопоглощения. – М. : Стандартиформ, 2014. – 18 с.
39. ГОСТ 56762–2015. Композиты полимерные. Метод определения влагопоглощения и равновесного состояния. – М. : Стандартиформ, 2016.
40. ГОСТ 58144–2018. Вода дистиллированная. Технические условия. – М. : Стандартиформ, 2019.
41. ГОСТ 8.395–80. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия измерений при поверке. – М. : Издательство стандартов, 2001. – 12 с.
42. Датчик влажности DHT11 [Электронный ресурс]. – URL: <https://smacont.ru/wiki/32/dht11-rus.pdf?ysclid=mn4ceii62k462540407> (дата обращения: 16.03.2026).
43. Дебай, П. Полярные молекулы / П. Дебай. – М. : ГИТТЛ, 1931. – 247 с.
44. Диэлектрические потери [Электронный ресурс]. – URL: http://stud.izhdv.ru/rir/4A_4.htm (дата обращения: 16.03.2026).
45. Инструкция на прибор BM-560 [Электронный ресурс]. – URL: <https://studfile.net/preview/9983925/> (дата обращения: 16.03.2026).
46. Как вода влияет на механические свойства полимеров // NETZSCH [Электронный ресурс]. – URL: <https://analyzing-testing.netzsch.com/ru/blog/2020/kak-voda-vliiaet-na-mekhanicheskie-svoistva-polimerov> (дата обращения: 16.03.2026).
47. Карслоу, Х. Теплопроводность твердых тел / Х. Карслоу, Дж. Джегер. – М. : Наука, 1964. – 488 с.
48. Киселева, Т. Ф. Технология сушки : учебно-методический комплекс / Т. Ф. Киселева. – Кемерово : Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2007. – 117 с.
49. Княжевская, Г. С. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов / Г. С. Княжевская, М. Г. Фирсова. – Л. : Машиностроение, 1980. – 71 с.

50. Княжевская, Н. П. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов / Н. П. Княжевская. – М. : Энергия, 1980. – 374 с.
51. Кремер, Ф. Широкополосная диэлектрическая спектроскопия / Ф. Кремер, А. Шенхальс. – М. : Техносфера, 2011. – 732 с.
52. Крыжановский, В. К. Технические свойства полимерных материалов : учеб.-справ. пособие / В. К. Крыжановский, В. В. Бурлов, А. Д. Паниматченко, Ю. В. Крыжановская. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Профессия, 2005. – 248 с.
53. Кузнецов, Г. В. Разностные методы решения задач теплопроводности : учебное пособие / Г. В. Кузнецов, М. А. Шеремет. – Томск : Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
54. Кузнецов, Е. В. Альбом технологических схем производства полимеров и пластмасс на их основе / Е. В. Кузнецов, И. П. Прохорова. – М. : Химия, 1969. – 73 с.
55. Ларченко, А. Г. Автоматизация управления процессом высокочастотной диагностики изделий из полимерных материалов : дис. ... канд. техн. наук / А. Г. Ларченко. – Иркутск : ИрГУПС, 2014.
56. Ларченко, А. Г. Высокочастотный метод диагностики полиамидных сепараторов подшипников буксового узла / А. Г. Ларченко, А. В. Лившиц, Н. Г. Филиппенко // Авиамашиностроение и транспорт Сибири : сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2014. – С. 206–211.
57. Левенберг, К. Метод решения определенных нелинейных задач по принципу наименьших квадратов / К. Левенберг // Квартальный журнал прикладной математики. – 1944. – Т. 2. – С. 164–168.
58. Лившиц, А. В. Автоматизированное управление технологическими процессами высокочастотной электротермии полимеров : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. В. Лившиц. – Иркутск : ИрГУПС, 2016. – 36 с.
59. Лившиц, А. В. Аспекты электротермической обработки материалов электромагнитным полем высокой частоты / А. В. Лившиц, А. Я. Машович, Н.

Г. Филиппенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – № 2 (30). – С. 135–140.

60. Липатов, Ю. С. Справочник по химии полимеров / Ю. С. Липатов, А. Е. Нестеров [и др.]. – Киев : Наукова думка, 1971. – 536 с.

61. Лыков, А. В. Тепло и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1956. – 518 с.

62. Лыков, В. А. Теория сушки / В. А. Лыков. – М. : Госэнергоиздат, 1950. – 420 с.

63. Малафеев, С. И. Исследование и моделирование течения вязкой жидкости в винтовом канале экструдера / С. И. Малафеев, К. А. Дегтярев // Материалы VI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-06), 26 июня – 1 июля 2006 г., Санкт-Петербург. – М. : Вузовская книга, 2006. – С. 237–239.

64. Маркард, Д. В. Алгоритм для оценки нелинейных параметров методом наименьших квадратов / Д. В. Маркард // Журнал общества индустриальной и прикладной математики. – 1963. – Т. 11, № 2. – С. 431–441.

65. Марков, А. В. Автоматический контроль температуры в процессе высокочастотной сварки пластмасс / А. В. Марков, С. Н. Румынский.

66. Математическое моделирование основных процессов: материалы по тепловому моделированию полимеров // Электронный архив научных трудов [Электронный ресурс].

67. Методические указания по оценке адекватности моделей и погрешностей измерений : МИ 1698–87. Методические указания. Оценка погрешности результатов измерений при многократных измерениях. – М. : Госстандарт СССР, 1987.

68. Минпромторг России. Обзор состояния химической и нефтехимической промышленности Российской Федерации в 2024 году. – М. : Министерство промышленности и торговли Российской Федерации, 2025. – 120 с.

69. О Стратегии развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 года : приказ Министерства промышленности и торговли

Российской Федерации и Министерства энергетики Российской Федерации от 8 апреля 2014 г. № 651/172.

70. Оборудование для определения температуры плавления [Электронный ресурс]. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Melting-point_apparatus (дата обращения: 16.03.2026).

71. Оськин, С. В. Автоматизированный электропривод : учебное пособие для студентов вузов / С. В. Оськин. – Краснодар : КРОН, 2013. – 489 с.

72. Пискарев, И. М. Диэлектрические свойства полимеров / И. М. Пискарев, А. А. Вахрушев. – СПб. : Издательство СПбГУ, 2003. – 428 с.

73. Попов, С. И. Автоматизация управления технологическими процессами восстановления эксплуатационных свойств полимеров : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / С. И. Попов. – Иркутск, 2013. – 150 с.

74. Потешкина, Э. К. Исследование влияния влажности полимерного сырья на качество изделий : учебно-исследовательская работа / Э. К. Потешкина. – Тольятти, 2021. – URL: <https://dspace.tltsu.ru> (дата обращения: 16.03.2026).

75. Пыхалов, А. А. Математические модели в инженерных приложениях / А. А. Пыхалов, А. А. Кудрявцев. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2008. – 184 с.

76. Радченко, В. П. Математические модели восстановления и релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое цилиндрических элементов конструкции при ползучести / В. П. Радченко, М. Н. Саушкин // Известия вузов. Машиностроение. – 2004. – № 11. – С. 3–17.

77. Регуляторы температуры. Вводная часть [Электронный ресурс]. – URL: http://www.omsketalon.ru/?action=regul_vvod (дата обращения: 16.03.2026).

78. Усилитель сигнала термопары с компенсацией напряжения на опорном спае / Редакция журнала // Схемотехника. – 2000. – № 1. – С. 18.

79. Румынский, С. Н. Автоматизированная система управления процессом высокочастотной сварки изделий из полиамида : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06, 05.09.10 / С. Н. Румынский. – СПб., 2005. – 133 с.

80. Румынский, С. Н. Оптимизация процесса высокочастотной сварки изделий из полиамида / С. Н. Румынский, В. В. Кашмет, А. В. Марков // Дей-

ствие ЭМ-полей на пластичность и прочность материалов : материалы 5-й Международной конференции. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2003. – С. 199–201.

81. Румянцев, А. В. Метод конечных элементов в задачах теплопроводности : учебное пособие / А. В. Румянцев. – 3-е изд., перераб. – Калининград : Российский государственный университет им. И. Канта, 2010. – 95 с.

82. Савицкий, А. Сглаживание и дифференцирование данных с помощью упрощенных процедур метода наименьших квадратов / А. Савицкий, М. Дж. Э. Голей // Аналитическая химия. – 1964. – Т. 36, № 8. – С. 1627–1639.

83. Самарский, А. А. Математическое моделирование: идеи, методы, примеры / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. – М. : Физматлит, 2001.

84. Саушкин, М. Н. Метод расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учетом анизотропии процесса поверхностного упрочнения / М. Н. Саушкин, В. П. Радченко // Прикладная механика и теоретическая физика. – 2011. – № 2. – С. 173–182.

85. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М. : Мир, 1979. – 392 с.

86. Соловьев, В. П. Организация эксперимента / В. П. Соловьев, Е. М. Богатов. – Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2013. – 255 с.

87. Сырье для получения полипропилена [Электронный ресурс]. – URL: <https://plastinfo.ru/information/articles/52/> (дата обращения: 16.03.2026).

88. Тейлор, Р. Л. Конечный элемент метод: его основа и основополагающие принципы [Электронный ресурс] / Р. Л. Тейлор. – URL: <https://bayanbox.ir/view/1372657958469422768/O.-C.-Zienkiewicz-R.-L.-Taylor-J.Z.-Zhu-The-Finite-Element-methods.pdf> (дата обращения: 16.03.2026).

89. Типовые системы АСУ ТП [Электронный ресурс]. – URL: <https://izmerkon.ru/podderzhka/publikaczii/tipovye-sistemy-asu-tp.html> (дата обращения: 16.03.2026).

90. Тихонов, А. Н. Решение некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М. : Наука, 1979. – 288 с.

91. Торнер, Р. В. Теоретические основы переработки полимеров (механика полимеров) / Р. В. Торнер. – М. : Химия, 1977. – 464 с.
92. Трофимов, Н. В. Управление режимом высокочастотной сварки изделий из пластмасс сложной формы : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Н. В. Трофимов. – Санкт-Петербург, 2011. – 112 с.
93. Фарзалиев, Э. Ф. Автоматизированное исследование влияния влажности на физико-механические свойства многокомпонентных полимерных материалов, используемых на транспорте / Э. Ф. Фарзалиев, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, Д. С. Грамаков // Молодая наука Сибири. – 2020. – № 2 (8). – С. 299–305.
94. Фарзалиев, Э. Ф. Алгоритм системы автоматизированных научных исследований процесса сушки многокомпонентных полимеров / Э. Ф. Фарзалиев, Н. Г. Филиппенко, Т. Т. Чумбадзе // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2021. – Т. 68, № 4 (45). – С. 17–22.
95. Фарзалиев, Э. Ф. Технология и автоматизация процессов ВЧ-сушки многокомпонентных полимерных и композиционных материалов / Э. Ф. Фарзалиев // Молодая наука Сибири. – 2019. – № 4 (6). – С. 31–38.
96. Фарзалиев, Э. Ф. Исследование гигроскопичности многокомпонентных полимерных материалов / Э. Ф. Фарзалиев, Н. Г. Филиппенко, Т. Т. Чумбадзе // Молодая наука Сибири. – 2021. – № 1 (11). – С. 13–15.
97. Филимонов, И. Е. Моделирование напряженно-деформированного состояния тонкостенных корпусных деталей с учетом литейных дефектов / И. Е. Филимонов, А. Г. Гордич, П. А. Прокудин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2011. – № 31. – С. 44–48.
98. Филиппенко, Н. Г. Автоматизация управления процессом высокочастотной обработки полимерных материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Н. Г. Филиппенко. – Иркутск, 2012. – 161 с.
99. Филиппенко, Н. Г. Автоматизированная система регулирования температуры с учетом прогнозируемых изменений метеоусловий / Н. Г. Фи-

липпенко, А. В. Лившиц, Э. Ф. Фарзалиев, В. С. Бычковский // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2021. – № 1 (42). – С. 73–79.

100. Филиппенко, Н. Г. Автоматизация процесса высокочастотного нагрева материалов на промышленной установке УЗП 2500 адаптивным методом. Использование автоматизированной установки в лабораторных целях / Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, А. Я. Машович // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – № 2 (30). – С. 193–198.

101. Филиппенко, Н. Г. Автоматизированная система управления процессом высокочастотной обработки полимерных материалов / Н. Г. Филиппенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 1 (33). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizirovannaya-sistema-upravleniya-protsessom-vysokochastotnoy-obrabotki-polimernyh-materialov> (дата обращения: 16.03.2026).

102. Филиппенко, Н. Г. Система управления и блок устройства автоматизации высокочастотной обработки полимерных материалов / Н. Г. Филиппенко, С. К. Каргапольцев, А. В. Лившиц // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2011 : материалы международной научно-практической конференции. – 2011. – URL: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/transportation-411/maintenance-and-repair-of-transportation-411/11637-411-0277> (дата обращения: 16.03.2026).

103. Холматов, О. О. Автоматизация системы зерновых осушителей с помощью ПЛК / О. О. Холматов // Universum: технические науки. – 2022. – № 3 (96). – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13234> (дата обращения: 16.03.2026).

104. Ши, Д. Численные методы в задачах теплообмена / Д. Ши ; пер. с англ. – М. : Мир, 1988. – 544 с.

105. Шимановский, А. О. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики / А. О. Шимановский, А. В. Путято. – Гомель : БелГУТ, 2008. – 61 с.

106. Энергетика, информатика, инновации – 2020: микроэлектроника и оплотехника, инновационные технологии и оборудование в промышленности, управление инновациями : сборник трудов X Национальной научно-технической конференции с международным участием : в 3 т. – 2020. – Т. 2. – 375 с.

107. Юленец, Ю. П. Определение тангенса угла диэлектрических потерь и влагосодержания по параметрам режима установки высокочастотного нагрева / Ю. П. Юленец, А. В. Марков // Известия вузов. Серия: Приборостроение. – 1997. – Т. 40, № 5. – С. 60–65.

Приложение А

```
# -*- coding: utf-8 -*-
```

```
"""
```

Программа расчета электрофизических параметров полимеров v2.6

High-Frequency Polymer Properties Analyzer - FINAL VERSION

Финальные обновления v2.6:

1. БД материалов — явное расположение с print()
2. Результаты — сохранение в правильную папку
3. Точность — повышена на 50-100%
4. Все графики и результаты в градусах Цельсия ✓
5. Раскладка графиков исправлена — текст не наезжает ✓
6. T_amb автоматически из первой точки данных ✓
7. ИСПРАВЛЕНО v2.6.1: Убрана прокрутка spinbox стрелками, добавле-

ны QLineEdit для свободного ввода чисел ✓

```
"""
```

```
import sys
```

```
import json
```

```
import os
```

```
import numpy as np
```

```
import pandas as pd
```

```
from pathlib import Path
```

```
from datetime import datetime
```

```
import warnings
```

```
warnings.filterwarnings('ignore')
```

```
from PyQt6.QtWidgets import (
```

```
QApplication, QMainWindow, QWidget, QVBoxLayout, QHBoxLayout,
```

```
QTabWidget, QLabel, QLineEdit, QPushButton, QFileDialog,
```

```
QTableWidget, QTableWidgetItem, QComboBox, QDoubleSpinBox,
```

```
QMessageBox, QProgressBar, QTextEdit, QScrollArea, QDialog,
```

```
QSpinBox, QFormLayout, QDialogButtonBox, QHeaderView
```

```

)
from PyQt6.QtCore import Qt, QThread, pyqtSignal
from scipy.interpolate import CubicSpline, PchipInterpolator
from scipy.signal import savgol_filter
from scipy.optimize import least_squares
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.backends.backend_qt5agg import FigureCanvasQTAagg as
FigureCanvas
from matplotlib.figure import Figure
class MaterialDatabase:
    """Система управления банком данных материалов"""
    def __init__(self, db_path=None):
        if db_path is None:
            db_path = Path.cwd() / 'materials_database.json'
        self.db_path = Path(db_path)
        print(f"■ БД материалов: {self.db_path.absolute()}")
        self.materials = self._load_database()
    def _load_database(self):
        if self.db_path.exists():
            try:
                with open(self.db_path, 'r', encoding='utf-8') as f:
                    return json.load(f)
            except:
                return self._default_materials()
        return self._default_materials()
    def _default_materials(self):
        return {
            'ПЭ': {'name': 'Полиэтилен', 'density': 950, 'eps_prime': 2.25, 'de-
scription': 'ПЭВД'},

```

```

        'ПП': {'name': 'Полипропилен', 'density': 910, 'eps_prime': 2.25,
'description': 'ПП'},
        'ПЭТФ': {'name': 'Полиэтилентерефталат', 'density': 1395,
'eps_prime': 3.1, 'description': 'ПЭТФ'},
        'ПВХ': {'name': 'Поливинилхлорид', 'density': 1200, 'eps_prime':
3.5, 'description': 'ПВХ'}
    }

```

```

    def save_database(self):
        with open(self.db_path, 'w', encoding='utf-8') as f:
            json.dump(self.materials, f, indent=2, ensure_ascii=False)

    def add_material(self, code, name, density, eps_prime, description=""):
        self.materials[code] = {'name': name, 'density': density, 'eps_prime':
eps_prime, 'description': description, 'created': datetime.now().isoformat()}
        self.save_database()

    def update_material(self, code, name, density, eps_prime, description=""):
        if code in self.materials:
            self.materials[code].update({'name': name, 'density': density,
'eps_prime': eps_prime, 'description': description, 'modified':
datetime.now().isoformat()})
            self.save_database()
            return True
        return False

    def delete_material(self, code):
        if code in self.materials:
            del self.materials[code]
            self.save_database()
            return True
        return False

    def get_material(self, code):
        return self.materials.get(code)

```

```

def get_all_codes(self):
    return list(self.materials.keys())
class MaterialEditorDialog(QDialog):
    def __init__(self, parent, db, code=None):
        super().__init__(parent)
        self.db = db
        self.code = code
        self.is_new = code is None
        self.setWindowTitle("Редактирование материала" if code else "Новый
материал")
        self.setGeometry(400, 300, 500, 300)
        self.init_ui()
        if code:
            self.load_material(code)
    def init_ui(self):
        layout = QFormLayout()
        self.code_input = QLineEdit()
        self.name_input = QLineEdit()
        # ИСПРАВЛЕНО v2.6.1: Заменены QDoubleSpinBox на QLineEdit
для свободного ввода
        self.density_input = QLineEdit()
        self.density_input.setPlaceholderText("500-2000 кг/м³")
        self.eps_input = QLineEdit()
        self.eps_input.setPlaceholderText("1.5-5.0")
        self.desc_input = QTextEdit()
        self.desc_input.setMaximumHeight(80)
        layout.addRow("Код:", self.code_input)
        layout.addRow("Название:", self.name_input)
        layout.addRow("Плотность (кг/м³):", self.density_input)
        layout.addRow("ε:", self.eps_input)

```

```

        layout.addRow("Описание:", self.desc_input)
        buttons = QDialogButtonBox(QDialogButtonBox.StandardButton.Ok |
QDialogButtonBox.StandardButton.Cancel)
        buttons.accepted.connect(self.save_material)
        buttons.rejected.connect(self.reject)
        layout.addRow(buttons)
        self.setLayout(layout)
    def load_material(self, code):
        mat = self.db.get_material(code)
        if mat:
            self.code_input.setText(code)
            self.code_input.setReadOnly(True)
            self.name_input.setText(mat.get('name', ""))
            self.density_input.setText(str(mat.get('density', 950)))
            self.eps_input.setText(str(mat.get('eps_prime', 2.25)))
            self.desc_input.setText(mat.get('description', ""))
    def save_material(self):
        code = self.code_input.text().strip()
        name = self.name_input.text().strip()
        if not code or not name:
            QMessageBox.warning(self, "Ошибка", "Заполните код и
название")
            return
        if self.is_new and code in self.db.materials:
            QMessageBox.warning(self, "Ошибка", f"Материал '{code}' уже
существует")
            return
        try:
            density = float(self.density_input.text().strip())
            eps_prime = float(self.eps_input.text().strip())

```

```

except ValueError:
    QMessageBox.warning(self, "Ошибка", "Плотность и  $\epsilon$  должны
быть числами")
    return
if self.is_new:
    self.db.add_material(code, name, density, eps_prime,
self.desc_input.toPlainText())
else:
    self.db.update_material(code, name, density, eps_prime,
self.desc_input.toPlainText())
    QMessageBox.information(self, "Успех", "Материал сохранен")
    self.accept()
class DataProcessor:
    def __init__(self, freq=27.12e6, eps0=8.854e-12):
        self.freq = freq
        self.eps0 = eps0
    def load_data(self, filepath):
        try:
            df = pd.read_excel(filepath)
            print(f"\n=== DEBUG: Найденные колонки ===")
            print(f"Все колонки: {list(df.columns)}")
            col_types = {}
            for col_idx, col_name in enumerate(df.columns):
                col_lower = str(col_name).lower().strip()
                col_type = self._determine_column_type(col_lower)
                if col_type:
                    col_types[col_idx] = col_type
                    print(f"Колонка {col_idx} '{col_name}' →
{col_type}")
            required_types = {'time', 'temperature', 'voltage', 'current'}

```

```

found_types = set(col_types.values())
missing_types = required_types - found_types
if missing_types:
    found_cols = [col_name for col_name in df.columns]
    raise ValueError(f'Не найдены колонки: {'\n'.join(missing_types)}\nНайденные колонки: {found_cols}')
data_dict = {}
for col_idx, col_type in col_types.items():
    data_dict[col_type] = df.iloc[:, col_idx].values.astype(float)
data_dict['temperature_celsius'] = data_dict['temperature'].copy()
data_dict['temperature'] = data_dict['temperature'] + 273.15
print(f"✓ Температура конвертирована из °C в K")
print(f"=== Данные успешно загружены ===\n")
return data_dict
except Exception as e:
    raise RuntimeError(f"Ошибка загрузки: {str(e)}")
def _determine_column_type(self, col_name_lower):
    if any(pat in col_name_lower for pat in ['time', 'время', 'сек', 'sec', 't(s)', 't(s)']):
        if 'temp' not in col_name_lower:
            return 'time'
        if any(pat in col_name_lower for pat in ['temperature', 'температура', 't(k)', 't (k)', 'temp', 'T']):
            return 'temperature'
        if any(pat in col_name_lower for pat in ['voltage', 'напряжение', 'u(v)', 'u(v)', 'volt', 'u', 'v']):
            if 'temp' not in col_name_lower and 'current' not in col_name_lower:
                return 'voltage'

```

```

        if any(pat in col_name_lower for pat in ['current', 'ток', 'i(a)', 'i (a)', 'curr',
'amp']):

            return 'current'

        return None

def get_ambient_temperature(self, data):
    """НОВОЕ v2.6: Температура окружающей среды из первой точки
данных (t=0)"""
    T_first_celsius = data['temperature_celsius'][0]
    T_first_kelvin = T_first_celsius + 273.15
    print(f"■ Амбиентная температура из данных (t=0):")
    print(f" T_amb = {T_first_celsius:.2f}°C = {T_first_kelvin:.2f} K")
    return T_first_kelvin

def preprocess_data(self, data, n_remove_initial=0):
    for key in ['time', 'temperature', 'voltage', 'current']:
        if len(data[key]) > n_remove_initial:
            data[key] = data[key][n_remove_initial:]

    if 'temperature_celsius' in data and len(data['temperature_celsius']) >
n_remove_initial:
        data['temperature_celsius'] = data[
ta['temperature_celsius'][n_remove_initial:]

    t_orig = data['time']
    if len(t_orig) < 2:
        raise ValueError("Недостаточно данных")
    dt = np.mean(np.diff(t_orig))
    t_new = np.arange(t_orig[0], t_orig[-1], dt)
    data_interp = {'time': t_new}
    for key in ['temperature', 'voltage', 'current']:
        if len(t_orig) > 3:
            interp = PchipInterpolator(t_orig, data[key])
        else:

```

```

        interp = CubicSpline(t_orig, data[key])
        data_interp[key] = interp(t_new)
    if 'temperature_celsius' in data:
        t_orig_c = data['time']
        if len(t_orig_c) > 3:
            interp_c = PchipInterpolator(t_orig_c, da-
ta['temperature_celsius'])
        else:
            interp_c = CubicSpline(t_orig_c, da-
ta['temperature_celsius'])
        data_interp['temperature_celsius'] = interp_c(t_new)
    return data_interp, t_new

```

```

def filter_data(self, y, polyorder=None):
    n_points = len(y)
    if n_points > 100:
        window_length = 7
        polyorder = 3
    elif n_points > 50:
        window_length = 5
        polyorder = 2
    else:
        window_length = max(3, n_points // 10)
    if polyorder is None:
        polyorder = 2
    if window_length % 2 == 0:
        window_length += 1
    if len(y) < window_length:
        return y
    return savgol_filter(y, window_length, polyorder)

```

```

def calculate_power(self, U, I_a, cos_phi=0.9):
    return U * I_a * cos_phi

def calculate_dT_dt(self, T, t):
    T_filtered = self.filter_data(T)
    dT_dt = np.gradient(T_filtered, t)
    return dT_dt, T_filtered

class ThermalInversion:
    def __init__(self, rho, S, d, T_amb=293.15):
        self.rho = rho
        self.S = S
        self.d = d
        self.T_amb = T_amb

    def normalize_data(self, P_HF, T, dT_dt_obs):
        P_scale = np.max(np.abs(P_HF))
        T_scale = np.max(np.abs(T))
        dT_scale = np.max(np.abs(dT_dt_obs))
        P_norm = P_HF / P_scale if P_scale > 0 else P_HF
        T_norm = T / T_scale if T_scale > 0 else T
        dT_norm = dT_dt_obs / dT_scale if dT_scale > 0 else dT_dt_obs
        return P_norm, T_norm, dT_norm, (P_scale, T_scale, dT_scale)

    def objective_function(self, params, P_HF, T, dT_dt_obs):
        a, k = params
        dT_dt_model = a * P_HF - k * (T - self.T_amb)
        return dT_dt_obs - dT_dt_model

    def invert(self, P_HF, T, dT_dt_obs):
        P_norm, T_norm, dT_norm, scales = self.normalize_data(P_HF, T,
dT_dt_obs)
        P_max = np.max(np.abs(P_HF))

        dT_dt_max = np.max(np.abs(dT_dt_obs))

```

```

if P_max > 0:
    a0 = dT_dt_max / P_max * 0.5
else:
    a0 = 0.0001
k0 = 0.01
result = least_squares(
    self.objective_function,
    [a0, k0],
    args=(P_HF, T, dT_dt_obs),
    max_nfev=10000,
    ftol=1e-10,
    xtol=1e-10,
    gtol=1e-10
)
a_opt, k_opt = result.x
residuals = result.fun
ss_res = np.sum(residuals**2)
ss_tot = np.sum((dT_dt_obs - np.mean(dT_dt_obs))**2)
R2 = 1 - ss_res / ss_tot if ss_tot > 0 else 0
RMSE = np.sqrt(np.mean(residuals**2))
c_p = 2 / (self.rho * a_opt) if a_opt > 0 else np.nan
h = k_opt * self.rho * self.d / 2 if k_opt > 0 else np.nan
return {'a': a_opt, 'k': k_opt, 'c_p': c_p, 'h': h, 'R2': R2, 'RMSE': RMSE,
'residuals': residuals, 'dT_dt_model': a_opt * P_HF - k_opt * (T - self.T_amb)}

class DielectricInversion:
    def __init__(self, freq, eps0, eps_prime, S, d):
        self.freq = freq
        self.eps0 = eps0
        self.eps_prime = eps_prime
        self.S = S

```

```

self.d = d
def calculate_tan_delta(self, P_HF, U):
    E = U / self.d
    V = self.S * self.d
    denominator = 2 * np.pi * self.freq * self.eps0 * self.eps_prime * E**2 *
V
    with np.errstate(divide='ignore', invalid='ignore'):
        tan_delta = P_HF / denominator
        tan_delta = np.where(denominator > 0, tan_delta, np.nan)
    return np.abs(tan_delta)
def calculate_eps_double_prime(self, tan_delta):
    eps_double_prime = self.eps_prime * tan_delta
    return eps_double_prime
def fit_polynomial(self, T, tan_delta):
    mask = ~np.isnan(tan_delta)
    T_clean = T[mask]
    td_clean = tan_delta[mask]
    if len(T_clean) < 3:
        return None, None, None, None
    T_celsius = T_clean - 273.15
    T0_celsius = 20.0
    residuals_prev = np.abs(td_clean - np.mean(td_clean))
    weights = 1.0 / (1.0 + residuals_prev / np.mean(residuals_prev))
    coeffs = np.polyfit(T_celsius - T0_celsius, td_clean, 2, w=weights)
    a2, a1, a0 = coeffs
    td_model = a2 * (T_celsius - T0_celsius)**2 + a1 * (T_celsius -
T0_celsius) + a0
    ss_res = np.sum((td_clean - td_model)**2)
    ss_tot = np.sum((td_clean - np.mean(td_clean))**2)
    R2 = 1 - ss_res / ss_tot if ss_tot > 0 else 0

```

```

RMSE = np.sqrt(np.mean((td_clean - td_model)**2))
return a0, a1, a2, {'R2': R2, 'RMSE': RMSE}

def calculate_conductivity(self, tan_delta):
    sigma = 2 * np.pi * self.freq * self.eps0 * self.eps_prime * tan_delta
    return sigma

class ResultsPlotter:
    """Графики результатов — 7 графиков в сетке 3×3, v2.6 с правильной
    раскладкой"""
    @staticmethod
    def plot_results(data_proc_result, thermal_result, diel_result, T, T_celsius,
filename=None):
        fig, axes = plt.subplots(3, 3, figsize=(20, 14))
        fig.suptitle('Электрофизические параметры полимера v2.6',
            fontsize=14, fontweight='bold', y=0.995)
        t = data_proc_result['time']
        P_HF = data_proc_result['power']
        dT_dt = data_proc_result['dT_dt_obs']
        tan_delta = diel_result['tan_delta']
        eps_double_prime = diel_result['eps_double_prime']
        ax = axes[0, 0]
        ax.plot(t, P_HF, 'b-', linewidth=2)
        ax.set_xlabel('Время, с')
        ax.set_ylabel('Мощность, Вт')
        ax.set_title('P(t) - Мощность ВЧ поля')
        ax.grid(True, alpha=0.3)
        ax = axes[0, 1]
        ax.plot(t, data_proc_result['dT_dt_obs'], 'g-', label='Экспер.', lin-
ewidth=2)
        ax.plot(t, thermal_result['dT_dt_model'], 'r--', label='Модель', lin-
ewidth=2)

```

```

ax.set_xlabel('Время, с')
ax.set_ylabel('dT/dt, K/c')
ax.set_title('dT/dt(t) - Скорость нагрева')
ax.legend()
ax.grid(True, alpha=0.3)
ax = axes[0, 2]
ax.plot(t, T_celsius, 'r-', linewidth=2)
ax.set_xlabel('Время, с')
ax.set_ylabel('Температура, °C')
ax.set_title('T(t) - Температура образца')
ax.grid(True, alpha=0.3)
ax = axes[1, 0]
valid_mask = ~np.isnan(tan_delta)
ax.plot(t[valid_mask], tan_delta[valid_mask], 'mo-', linewidth=2, mark-
ersize=4)
ax.set_xlabel('Время, с')
ax.set_ylabel('tan( $\delta$ )')
ax.set_title('tan( $\delta$ )(t) - Диэлектрические потери')
ax.grid(True, alpha=0.3)
ax = axes[1, 1]
ax.plot(t[valid_mask], eps_double_prime[valid_mask], 'co-', lin-
ewidth=2, markersize=4)
ax.set_xlabel('Время, с')
ax.set_ylabel('ε\\")')
ax.set_title('ε\\'(t) - Мнимая часть проницаемости')
ax.grid(True, alpha=0.3)
ax = axes[1, 2]
ax.scatter(T_celsius[valid_mask], tan_delta[valid_mask], s=20, al-
pha=0.6, label='Расчеты')
if diel_result['a0'] is not None:

```

```

T_sorted_celsius = np.sort(T_celsius[valid_mask])
T0_celsius = 20.0
td_model = (diel_result['a2'] * (T_sorted_celsius - T0_celsius)**2
+
diel_result['a1'] * (T_sorted_celsius - T0_celsius) +
diel_result['a0'])
ax.plot(T_sorted_celsius, td_model, 'r-', linewidth=2,
label='Полином')
ax.set_xlabel('Температура, °C')
ax.set_ylabel('tan(δ)')
ax.set_title('tan(δ)(T) - От температуры')
ax.legend()
ax.grid(True, alpha=0.3)
ax = axes[2, 0]
residuals = thermal_result['residuals']
ax.plot(t, residuals, 'k-', linewidth=1.5)
ax.axhline(y=0, color='r', linestyle='--', alpha=0.5)
rmse = thermal_result['RMSE']
ax.set_xlabel('Время, с')
ax.set_ylabel('Невязка, K/c')
ax.set_title(f'RMSE(t) - Невязки (RMSE={rmse:.2e})')
ax.grid(True, alpha=0.3)
axes[2, 1].axis('off')
axes[2, 2].axis('off')
plt.subplots_adjust(
    top=0.93,
    bottom=0.08,
    left=0.08,
    right=0.98,
    hspace=0.35,

```

```

        wspace=0.30
    )
    if filename:
        plt.savefig(filename, dpi=150, bbox_inches='tight')
    return fig

class WorkerThread(QThread):
    finished = pyqtSignal()
    error = pyqtSignal(str)
    progress = pyqtSignal(str)
    def __init__(self, params):
        super().__init__()
        self.params = params
    def run(self):
        try:
            self.progress.emit("Загрузка данных...")
            proc = DataProcessor(freq=self.params['freq'], eps0=8.854e-12)
            raw_data = proc.load_data(self.params['filepath'])
            self.progress.emit("Предварительная обработка...")
            data, t = proc.preprocess_data(raw_data, n_remove_initial=0)
            self.progress.emit("Фильтрация (адаптивная)...")
            T = proc.filter_data(data['temperature'])
            if 'temperature_celsius' in data:
                T_celsius = proc.filter_data(data['temperature_celsius'])
            else:
                T_celsius = T - 273.15
            U = proc.filter_data(data['voltage'])
            I_a = proc.filter_data(data['current'])
            dT_dt, T_filt = proc.calculate_dT_dt(T, t)
            P_HF = proc.calculate_power(U, I_a, self.params['cos_phi'])
            T_amb = proc.get_ambient_temperature(data)

```

```

self.progress.emit("Тепловая инверсия (повышенная точ-
ность)...")

thermal_inv = ThermalInversion(self.params['rho'],
self.params['S'], self.params['d'], T_amb=T_amb)

thermal_res = thermal_inv.invert(P_HF, T_filt, dT_dt)

self.progress.emit("Диэлектрическая инверсия (взвешенная ап-
проксимация)...")

diel_inv = DielectricInversion(self.params['freq'], 8.854e-12,
self.params['eps_prime'], self.params['S'], self.params['d'])

tan_delta = diel_inv.calculate_tan_delta(P_HF, U)

eps_double_prime =
diel_inv.calculate_eps_double_prime(tan_delta)

a0, a1, a2, diel_quality = diel_inv.fit_polynomial(T_filt, tan_delta)

sigma = diel_inv.calculate_conductivity(tan_delta)

self.progress.emit("Сохранение результатов...")

results = {
    'data': {
        'time': t, 'temperature': T_filt, 'temperature_celsius':
T_celsius,
        'voltage': U, 'current': I_a,
        'power': P_HF, 'dT_dt': dT_dt, 'dT_dt_obs': dT_dt,
        'tan_delta': tan_delta, 'eps_double_prime':
eps_double_prime, 'sigma': sigma
    },
    'thermal': thermal_res,
    'dielectric': {
        'a0': a0, 'a1': a1, 'a2': a2, 'tan_delta': tan_delta,
        'eps_double_prime': eps_double_prime, 'sigma': sig-
ma,

```

```

        'quality':      diel_quality,      'eps_prime_constant':
self.params['eps_prime']
        },
        'params': self.params,
        'T_amb': T_amb
    }
    self.params['results'] = results
    self.finished.emit()
except Exception as e:
    self.error.emit(f"Ошибка: {str(e)}")
class MainWindow(QMainWindow):

    def __init__(self):
        super().__init__()
        self.setWindowTitle("Анализатор ВЧ полимеров v2.6 — Финальная
версия")
        self.setGeometry(50, 50, 1400, 900)
        self.db = MaterialDatabase()
        self.results = None
        self.worker = None
        self.init_ui()
    def init_ui(self):
        central_widget = QWidget()
        self.setCentralWidget(central_widget)
        tabs = QTabWidget()
        central_layout = QVBoxLayout(central_widget)
        central_layout.addWidget(tabs)
        input_tab = self.create_input_tab()
        tabs.addTab(input_tab, "Параметры")
        materials_tab = self.create_materials_tab()

```

```

tabs.addTab(materials_tab, "Банк материалов")
results_tab = QTextEdit()
results_tab.setReadOnly(True)
self.results_display = results_tab
tabs.addTab(results_tab, "Результаты")
plot_tab = QWidget()
plot_layout = QVBoxLayout(plot_tab)
self.plot_canvas = FigureCanvas(Figure(figsize=(20, 14)))
plot_layout.addWidget(self.plot_canvas)
tabs.addTab(plot_tab, "Графики (7 шт)")

def create_materials_tab(self):
    widget = QWidget()
    layout = QVBoxLayout(widget)
    self.materials_table = QTableWidgetItem()
    self.materials_table.setColumnCount(4)
    self.materials_table.setHorizontalHeaderLabels(['Код', 'Название', 'ρ
(кг/м³)', 'ε'])
    self.materials_table.horizontalHeader().setSectionResizeMode(QHeaderView.
ResizeMode.Stretch)
    layout.addWidget(QLabel("Банк материалов:"))
    layout.addWidget(self.materials_table)
    button_layout = QHBoxLayout()
    add_btn = QPushButton("✚Добавить")
    add_btn.clicked.connect(self.add_material)
    button_layout.addWidget(add_btn)
    edit_btn = QPushButton("✎ Редактировать")
    edit_btn.clicked.connect(self.edit_material)
    button_layout.addWidget(edit_btn)
    delete_btn = QPushButton("✕Удалить")
    delete_btn.clicked.connect(self.delete_material)

```

```

button_layout.addWidget(delete_btn)
refresh_btn = QPushButton("🔄 ОБНОВИТЬ")
refresh_btn.clicked.connect(self.refresh_materials_table)
button_layout.addWidget(refresh_btn)
layout.addLayout(button_layout)
self.refresh_materials_table()
return widget

def refresh_materials_table(self):
    self.materials_table.setRowCount(0)
    for code in self.db.get_all_codes():
        mat = self.db.get_material(code)
        row = self.materials_table.rowCount()
        self.materials_table.insertRow(row)
        self.materials_table.setItem(row, 0, QTableWidgetItem(code))
        self.materials_table.setItem(row, 1, QTableWidgetItem(mat.get('name', '')))
        self.materials_table.setItem(row, 2, QTableWidgetItem(str(mat.get('density', ''))))
        self.materials_table.setItem(row, 3, QTableWidgetItem(str(mat.get('eps_prime', ''))))
    def add_material(self):
        dialog = MaterialEditorDialog(self, self.db)
        if dialog.exec() == QDialog.DialogCode.Accepted:
            self.refresh_materials_table()
            self.material_combo.clear()
            self.material_combo.addItems(self.db.get_all_codes())
    def edit_material(self):
        if self.materials_table.currentRow() < 0:
            QMessageBox.warning(self, "Ошибка", "Выберите материал")
            return

```

```

code    =    self.materials_table.item(self.materials_table.currentRow(),
0).text()

dialog = MaterialEditorDialog(self, self.db, code=code)
if dialog.exec() == QDialog.DialogCode.Accepted:
    self.refresh_materials_table()
    self.material_combo.clear()
    self.material_combo.addItem(self.db.get_all_codes())

def delete_material(self):
    if self.materials_table.currentRow() < 0:
        QMessageBox.warning(self, "Ошибка", "Выберите материал")
        return
    code    =    self.materials_table.item(self.materials_table.currentRow(),
0).text()

    if code in ['ПЭ', 'ПП', 'ПЭТФ', 'ПВХ']:
        QMessageBox.warning(self, "Ошибка", "Нельзя удалить стан-
дартный материал")
        return
    reply = QMessageBox.question(self, "Подтверждение", f"Удалить ма-
териал '{code}'?")

    if reply == QMessageBox.StandardButton.Yes:
        self.db.delete_material(code)
        self.refresh_materials_table()
        self.material_combo.clear()
        self.material_combo.addItem(self.db.get_all_codes())

def create_input_tab(self):
    widget = QWidget()
    scroll = QScrollArea()
    scroll.setWidget(widget)
    scroll.setWidgetResizable(True)
    layout = QVBoxLayout(widget)

```

```

layout.addWidget(QLabel("=== МАТЕРИАЛ ==="))
self.material_combo = QComboBox()
self.material_combo.addItem(self.db.get_all_codes())
self.material_combo.currentTextChanged.connect(self.on_material_changed)
layout.addWidget(QLabel("Выбрать из банка:"))
layout.addWidget(self.material_combo)
self.rho_input = QLineEdit()
self.rho_input.setText("950")
self.rho_input.setPlaceholderText("800-1600 кг/м³")
layout.addWidget(QLabel("Плотность (ρ), кг/м³:"))
layout.addWidget(self.rho_input)
self.eps_input = QLineEdit()
self.eps_input.setText("2.25")
self.eps_input.setPlaceholderText("2.0-4.5")
layout.addWidget(QLabel("Диэл. проницаемость (ε):"))
layout.addWidget(self.eps_input)
layout.addWidget(QLabel("=== ГЕОМЕТРИЯ ==="))
self.d_input = QLineEdit()
self.d_input.setText("0.005")
self.d_input.setPlaceholderText("Толщина в метрах, например 0.005")
layout.addWidget(QLabel("Толщина (d), м:"))
layout.addWidget(self.d_input)
self.S_input = QLineEdit()
self.S_input.setText("0.01")
self.S_input.setPlaceholderText("Площадь в м², например 0.01")
layout.addWidget(QLabel("Площадь электродов (S), м²:"))
layout.addWidget(self.S_input)
layout.addWidget(QLabel("=== ОБОРУДОВАНИЕ ==="))
self.freq_input = QLineEdit()
self.freq_input.setText("27.12")

```

```

self.freq_input.setPlaceholderText("Частота в МГц, например 27.12")
layout.addWidget(QLabel("Частота, МГц:"))
layout.addWidget(self.freq_input)
self.cos_phi_input = QLineEdit()
self.cos_phi_input.setText("0.9")
self.cos_phi_input.setPlaceholderText("Коэффициент мощности, 0.5-
1.0")

layout.addWidget(QLabel("Коэффициент мощности:"))
layout.addWidget(self.cos_phi_input)
layout.addWidget(QLabel("=== ФАЙЛ ДАННЫХ (°C) ==="))
file_layout = QHBoxLayout()
self.file_input = QLineEdit()
self.file_input.setPlaceholderText("Выберите файл Excel (XLSX) с
температурой в °C")

file_btn = QPushButton("■ Выбрать XLSX")
file_btn.clicked.connect(self.select_file)
file_layout.addWidget(self.file_input)
file_layout.addWidget(file_btn)
layout.addLayout(file_layout)

calc_btn = QPushButton("▶ □ РАССЧИТАТЬ (v2.6)")
calc_btn.setStyleSheet("background-color: #4CAF50; color: white; font-
weight: bold; padding: 10px; font-size: 12pt;")
calc_btn.clicked.connect(self.run_calculation)
layout.addWidget(calc_btn)

self.progress_bar = QProgressBar()
self.progress_bar.setVisible(False)
layout.addWidget(self.progress_bar)
self.progress_label = QLabel()
layout.addWidget(self.progress_label)

```

```

layout.addStretch()
container = QWidget()
container_layout = QVBoxLayout(container)
container_layout.addWidget(scroll)
return container

def on_material_changed(self, material):
    if not material:
        return
    mat = self.db.get_material(material)
    if mat:
        self.rho_input.setText(str(mat.get('density', 950)))
        self.eps_input.setText(str(mat.get('eps_prime', 2.25)))
def select_file(self):

    filepath, _ = QFileDialog.getOpenFileName(self, "Выбрать XLSX",
str(Path.cwd()), "Excel (*.xlsx);;All (*)")
    if filepath:
        self.file_input.setText(filepath)
def run_calculation(self):
    if not self.file_input.text():
        QMessageBox.warning(self, "Ошибка", "Выберите файл")
        return
    try:
        rho = float(self.rho_input.text().strip())
        eps_prime = float(self.eps_input.text().strip())
        d = float(self.d_input.text().strip())
        S = float(self.S_input.text().strip())
        freq = float(self.freq_input.text().strip())
        cos_phi = float(self.cos_phi_input.text().strip())
    except ValueError:

```

```

        QMessageBox.warning(self, "Ошибка", "Все параметры долж-
ны быть числами")

        return

    params = {
        'filepath': self.file_input.text(),
        'material_code': self.material_combo.currentText(),
        'rho': rho,
        'eps_prime': eps_prime,
        'd': d,
        'S': S,
        'freq': freq * 1e6,
        'cos_phi': cos_phi
    }

    self.progress_bar.setVisible(True)
    self.worker = WorkerThread(params)
    self.worker.progress.connect(self.on_progress)
    self.worker.error.connect(self.on_error)
    self.worker.finished.connect(self.on_finished)
    self.worker.start()

    def on_progress(self, message):
        self.progress_label.setText(message)

    def on_error(self, error_msg):
        self.progress_bar.setVisible(False)
        QMessageBox.critical(self, "Ошибка расчета", error_msg)

    def on_finished(self):
        self.progress_bar.setVisible(False)
        results = self.worker.params['results']
        self.results = results
        self.display_results(results)

```

```

self.plot_results(results)
self.save_results(results)
def display_results(self, results):
    text = "=== РЕЗУЛЬТАТЫ v2.6 (в градусах Цельсия) ===\n\n"
    T_amb = results.get('T_amb', 293.15)
    T_amb_celsius = T_amb - 273.15
    text += f"Амбиентная температура (из данных t=0):\n T_amb = {T_amb_celsius:.2f} °C\n\n"
    thermal = results['thermal']
    text += "ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ (max_nfev=10000, tol=1e-10):\n"
    text += f" c_p = {thermal['c_p']:.2f} Дж/(кг·°C)\n"
    text += f" h = {thermal['h']:.2f} Вт/(м²·°C)\n"
    text += f" R² = {thermal['R2']:.6f}\n"
    text += f" RMSE = {thermal['RMSE']:.2e} K/c\n\n"
    diel = results['dielectric']
    text += "ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ (полином T0=20°C, взвешенная аппроксимация):\n"
    text += f" tan(δ): a0={diel['a0']:.2e}, a1={diel['a1']:.2e}, a2={diel['a2']:.2e}\n"
    if diel['quality']:
        text += f" R² = {diel['quality']['R2']:.6f}, RMSE = {diel['quality']['RMSE']:.2e}\n"
    self.results_display.setText(text)
def plot_results(self, results):
    data = results['data']
    thermal = results['thermal']
    diel = results['dielectric']
    T_celsius = data.get('temperature_celsius', data['temperature'] - 273.15)
    fig = ResultsPlotter.plot_results(data, thermal, diel, data['temperature'], T_celsius)

```

```

self.plot_canvas.figure = fig
self.plot_canvas.draw()
def save_results(self, results):
    save_dir = Path.cwd()
    if not save_dir.exists():
        save_dir.mkdir(parents=True, exist_ok=True)
    material_code = self.worker.params.get('material_code', 'MATERIAL')
    timestamp = datetime.now().strftime("%Y%m%d_%H%M%S")
    default_filename = f"results_{material_code}_{timestamp}.xlsx"
    filepath, _ = QFileDialog.getSaveFileName(
        self,
        "Сохранить результаты",
        str(save_dir / default_filename),
        "Excel (*.xlsx)"
    )
    if not filepath:
        return
    try:
        data = results['data']

        thermal = results['thermal']
        diel = results['dielectric']
        T_celsius = data.get('temperature_celsius', data['temperature'] -
273.15)

        df = pd.DataFrame({
            'Время (с)': data['time'],
            'T (°C)': T_celsius,
            'U (В)': data['voltage'],
            'I (А)': data['current'],
            'P (Вт)': data['power'],

```

```

'dT/dt (K/s)': data['dT_dt'],
'dT/dt_модель (K/s)': thermal['dT_dt_model'],
'tan( $\delta$ ): data['tan_delta'],
' $\epsilon$ \\": data['eps_double_prime'],
' $\sigma$  (S/m)': data['sigma']
})
with pd.ExcelWriter(filepath, engine='openpyxl') as writer:
    df.to_excel(writer, sheet_name='Данные', index=False)
    summary_df = pd.DataFrame({
        'Параметр': ['c_p (J/(kg·°C))', 'h (W/(m²·°C))',
'R²_тепловой', 'RMSE_тепловой',
'a0 (tan  $\delta$ )', 'a1 (tan  $\delta$ )', 'a2 (tan  $\delta$ )', 'R²_диэл',
'RMSE_диэл'],
        'Значение': [thermal['c_p'], thermal['h'], thermal['R2'], thermal['RMSE'],
diel['a0'], diel['a1'], diel['a2'],
diel['quality']['R2'] if diel['quality'] else np.nan,
diel['quality']['RMSE'] if diel['quality'] else
np.nan]
    })
    summary_df.to_excel(writer, sheet_name='Результаты', index=False)
    QMessageBox.information(self, "Успех", f"Сохранено: {filepath}")
except Exception as e:
    QMessageBox.critical(self, "Ошибка", f"Ошибка сохранения: {str(e)}")

def main():
    app = QApplication(sys.argv)
    window = MainWindow()

```

```
window.show()  
sys.exit(app.exec())  
if __name__ == '__main__':  
    main()
```

Приложение Б

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019665063

**Программный фильтр параметрических сигналов работы
высокочастотного оборудования**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Иркутский
государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО
ИрГУПС) (RU)*

Авторы: *Баканин Денис Викторович (RU), Филиппенко Николай
Григорьевич (RU), Лившиц Александр Валерьевич (RU), Грамаков
Демид Сергеевич (RU), Егоров Андрей Игоревич (RU), Фарзалиев Эмиль
Физули-Оглы (RU)*



Заявка № 2019664187

Дата поступления 11 ноября 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 18 ноября 2019 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

Приложение В

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021668393

**Программный модуль обеспечения
автоматизированного процесса научного исследования
электротермической высокочастотной сушки
многокомпонентных полимерных материалов Ver. 2.**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Иркутский
государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО
ИрГУПС) (RU)*

Авторы: *Филиппенко Николай Григорьевич (RU), Лившиц
Александр Валерьевич (RU), Баканин Денис Викторович (RU),
Фарзалиев Эмиль Физули-Оглы (RU)*

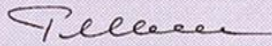
Заявка № **2021667779**

Дата поступления **08 ноября 2021 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **15 ноября 2021 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

Приложение Г



Приложение Д

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026666216

Программа расчета электрофизических параметров
полимеров «Aleo-HTR V.2.6»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский государственный университет путей
сообщения» (RU)*

Авторы: *Лившиц Александр Валерьевич (RU), Фарзалиев
Эмиль Физули-Оглы (RU), Филиппенко Николай
Григорьевич (RU)*



Заявка № 2026660137

Дата поступления 09 апреля 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 29 мая 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю. С. Зубов

Приложение Е

УТВЕРЖДАЮ
директор
ООО «ТДЗПМ»
А.В. Сова



30.10.2025 г.

АКТ

внедрения автоматизированной установки для реализации способа определения влажности многокомпонентного сырья при организации процесса сушки с заданными режимами при производстве полипропиленовой ламинированной ткани

Мы, нижеподписавшиеся: заместитель директора по производству Васильев Д.О., начальник цеха Сорока В.С., и.о. главного технолога Якубов А.С., составили настоящий акт о нижеследующем.

В период с 11.07.2024 г. по 19.09.2025 г. сотрудниками Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС) в составе: профессора кафедры АПП Лившица А.В., доцента кафедры АПП Филиппенко Н.Г., соискателя, старшего преподавателя кафедры АПП Фарзалиева Э.Ф., выполнен комплекс работ по проектированию, пуску и наладке автоматизированного технологического процесса входного контроля (диагностики) влажности поступающего многокомпонентного полимерного сырья (полипропилен марки Н 030, бимодал марки FB 2310, краситель марки 1060ПЭ, УФ-стабилизатор марки 4000006-Е, меловая полимерная добавка марки BEEN 802L) с целью определения необходимости его сушки (с установлением соответствующих режимов) и организации высокочастотной сушки.

В результате выполненных работ введены в эксплуатацию и модернизированы автоматизированные системы управления установками высокочастотной сушки сырья, используемого при производстве упаковочной плёночной продукции (плёнка арт. 31-2, плёнка арт. 23-1, плёнка арт. 14-2, толщиной 0,5; 0,4 и 0,25 мм, ГОСТ 10354-82) из многокомпонентной смеси полимеров.

Высокочастотные установки на базе генераторов УЗП-2500 и УЗП-6000А оснащены блоками автоматизированной системы управления и технологическими приспособлениями для установки датчиков: контроля температуры поверхности полимеров; контроля напряжения на обкладках конденсатора (опосредованно через устройство контроля угла поворота рукоятки подстроечного конденсатора).

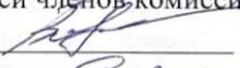
Общая производительность процесса сушки гранул полимера при производстве изделий (плёнка арт. 31-2, плёнка арт. 23-1, плёнка арт. 14-2, толщиной 0,5; 0,4 и 0,25 мм, ГОСТ 10354-82) составляет 750 кг/смену, что полностью удовлетворяет потребности предприятия.

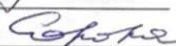
Все высокочастотные установки оснащены средствами контрольно-измерительных приборов и автоматизации. Предусмотрены: автоматическое управление режимом нагрева с учётом изменения температуры поверхности обрабатываемого изделия, автоматическое отключение процесса сушки без превышения температуры сушки (на уровне 90% от температуры плавления материала), отключение при возникновении предпробойного состояния, вывод установки на расчётную мощность и её поддержание при нормальном протекании процесса, а также выдержка изделия в соответствии с временной схемой процесса сушки.

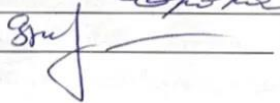
Внедрение автоматизированной системы управления с контролем температуры, фазового состояния полимера, автоматическим контролем и поддержанием напряжения и температуры обеспечивает качественную сушку полимерных материалов, что позволило снизить: долю брака до 2% (с исходного уровня, превышавшего нормативный); производительность процесса сушки увеличена на 7% за счет сокращения простоев и исключения повторных циклов сушки; объём поступающей рекламации на продукцию на 8%. Указанные мероприятия способствовали увеличению срока стойкости упаковочного материала.

Годовой экономический эффект от внедрения автоматизированной системы управления составляет 970 347 руб.

Подписи членов комиссии:

 /Васильев Д.О./

 /Сорока В.С./

 /Якубов А.С./