

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

УДК [519.816 + 004.942]:: 679.7

На правах рукописи

**ДЯТЛОВ ИЛЬЯ ЯКОВЛЕВИЧ**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ОПЕРАТОРА ЛИНИИ  
НЕПРЕРЫВНОЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ КАБЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Труфанова Наталия Михайловна

Пермь – 2023

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ .....	13
1.1. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ .....	13
1.2. ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ: ТИПЫ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ (ВИДЫ, СОСТАВ).....	18
1.3. АГРЕГАТЫ ДЛЯ ВУЛКАНИЗАЦИИ .....	20
1.4. СПОСОБЫ ВУЛКАНИЗАЦИИ .....	21
1.5. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВУЛКАНИЗАЦИИ.....	23
1.6. ПОДХОДЫ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ВУЛКАНИЗАЦИИ .....	26
1.7. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ .....	39
ГЛАВА 2. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ОПЕРАТОРА ЛИНИИ НЕПРЕРЫВНОЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ.....	39
2.1 СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ.....	41
2.2 АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ.....	43
2.3 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ .....	48
ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ОПЕРАТОРА ЛИНИИ НЕПРЕРЫВНОЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ.....	49
3.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ .....	49
3.2. МЕТОД РЕШЕНИЯ. СХОДИМОСТЬ РЕШЕНИЯ. ....	52
3.3. СРАВНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ. АНАЛИЗ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛЕЙ. ....	54
3.4. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ .....	57
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВУЛКАНИЗАЦИОННЫХ СВОЙСТВ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ .....	59

4.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВУЛКАНИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	59
4.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СТЕПЕНИ ВУЛКАНИЗАЦИИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВРЕМЕНИ. ....	65
4.3 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ .....	71
ГЛАВА 5. АНАЛИЗ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ .....	73
5.1 АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ВУЛКАНИЗАЦИИ.....	73
5.2. ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НА ПРОЦЕСС ВУЛКАНИЗАЦИИ .....	79
5.3. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ГЕОМЕТРИИ ЗАГОТОВКИ НА ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И КИНЕТИКИ... ..	83
5.4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА .....	89
5.5 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ.....	96
5.6 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ .....	98
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	102
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	103
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	121
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....	125

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит активное внедрение систем поддержки принятия решений (СППР) на различных промышленных объектах. Это обусловлено процессом цифровизации производств и развитием информационных технологий. Могут применяться как пассивные СППР (на уровне оперативного управления), так и активные (на уровне разработки технологии производства). Применение СППР позволяет технологам и операторам принимать обоснованные решения при выборе параметров процесса, обеспечивающих заданное качество продукции. Это в большой степени относится и к процессу вулканизации изоляции кабельной продукции.

На данный момент, оператор линии непрерывной вулканизации для известных марко-размеров выбирает скорость перемещения заготовки, исходя из технологических карт, разработанных технологами на основе расчетов и практического опыта. Однако, для новых изделий или иных материалов, выбор подходящей скорости не очевиден, т.к. данная задача выбора является когнитивно-сложной, требующей при расчетах значительных затрат времени технолога для учета физико-химических процессов вулканизации и кинетических свойств резин.

При этом, на процесс также влияют неуправляемые внешние факторы (перепад давления, неоднородность температуры, нестабильные свойства резины) компенсировать которые в ходе процесса вулканизации, должен оператор линии. Поэтому возникает актуальная задача повышения эффективности выбора управляющих параметров процесса вулканизации как для новых материалов и конструкций, так и для стандартных маркоразмеров при изменяющихся внешних условиях.

Вулканизация или сшивка изоляции проходит внутри вулканизационной трубы, где заготовка перемещается с заданной скоростью, а среда внутри трубы (пар или азот) нагревается до заданных температур. Слои изоляции прогреваются

неравномерно, отчего сшивка происходит с разной скоростью. Поэтому степень завершенности вулканизации неравномерна в радиальном и продольном направлении.

Задача дополнительно осложняется тем, что с каждым годом требования к качеству кабельно-проводниковой продукции возрастают, в том числе изменяются область применения и условия ее эксплуатации. Это приводит к тому, что выбор известных режимов не обеспечивает требуемого качества. Адаптация к новым требованиям или условиям происходит фактически путем проб и ошибок, что сопровождается существенными затратами.

Несмотря на значительный ряд исследований в этой области, на данный момент не существует подхода, описывающего процесс вулканизации резиновой изоляции с учетом неравномерности распределения температурного поля в изоляции в вулканизационной трубе и величины степени завершенности вулканизационного процесса на выходе из нее.

Поскольку получение качественного изделия зависит от многих параметров: геометрических, физических, кинетических, технологических, то необходимо провести системный анализ связи каждого из них с величиной степени сшивки и определить значимость параметров.

В процессе производства кабелей с резиновой изоляцией все вышеперечисленные параметры могут существенно изменяться и приводить к существенным отклонениям в температурных полях и степени вулканизации. В настоящее время оператор руководствуется проектными решениями, не учитывающими возможные изменения (например, изменение состава резины).

*Гипотеза* настоящего исследования заключается в том, что системный анализ особенностей вулканизации кабельной продукции с учетом процессов тепломассопереноса и кинетики, а также статистическая обработка экспериментальных данных позволят синтезировать систему поддержки принятия решений (СППР), оперативно предоставляющую оператору необходимые рекомендации при новых условиях, маркоразмерах или резиновых смесях.

### **Степень разработанности темы исследования.**

В последнее время для сложных процессов стали применяться адаптивные системы управления и СППР. Их изучали Кузнецов А.С.[1], Корнюшко В.Ф.[2], Маслов А.А.[3], Mumali F.[4], Milani G.[5] Однако для удовлетворительных результатов должны быть учтены особенности процесса вулканизации, где необходимо сочетать модель тепломассопереноса и кинетики вулканизации.

Вопросы управления процессом вулканизации рассмотрены в работах Митрохина А.А.[6], Осипова С.Ю.[7-8], Павлова В.В.[9-10], в которых предложены пути повышения эффективности управления процессами за счет применения методов математического моделирования. Описанные работы ориентированы, в основном, на процессы вулканизации крупногабаритных изделий, где управление происходит по величине температуры. Определению технологических параметров процесса вулканизации изоляции кабеля внимания практически не уделяется.

Исследованию процесса вулканизации посвящены работы отечественных и зарубежных ученых: Аваев А.А.[11], Иванов С.Д. [12], Ищенко В.А. [13,14], Кузнецов А.С. [1,2], Осипов С.Ю. [15-19], Ghoreishy M.[20-27], Rafei M.[28], Kamal M.[29-30], Milani G.[31-33], Mohammad R.E.[34] и многих других.

Существенное влияние на получаемый результат при исследовании процесса вулканизации оказывает выбор кинетической модели процесса. Большинство работ, в том числе работы Ивановой Е.В.[35-38], Кузнецова А.С.[1-2], Rafei M.[28], Kamal M.[29-30], Mohammad R.E.[34] рассматривали одно и двухстадийные модели кинетики вулканизации. Однако представленные модели не позволяли учитывать одновременно температурный и временной факторы и в большинстве случаев не отражали реальное состояние процесса.

Анализ влияния компонентного состава и теплофизических свойств резиновой смеси на протекание процесса вулканизации представлен в работах Митрохина А.А.[6], Молчанова В.И.[39-41], Осипова С.Ю.[18-19], Salaeh S.[42],

Likozar B.[43-44], Kong D.[45] и др. Исследования показали, что скорость процесса вулканизации зависит от температуры и используемых катализаторов.

Так как скорость процесса вулканизации зависит от температуры и времени пребывания материала при данной температуре, то для описания кинетического процесса необходимо рассматривать изменение температуры внутри исследуемой области во времени. В работах Иванова С.Д.[12], Ищенко В. А[14]., Тихомирова С. Г.[46], Леонова А.П.[47], Маслова А.А. [3], Ячикова И.М.[48], Ghoreishy M.[25-27], Rafei M.[28], Mohammad R.[34], и др. предложен широкий класс математических моделей тепломассопереноса.

Математические модели процесса вулканизации кабельной изоляции представлены в работах Ивановой Е.В. [36], Кузнецова Г.В. [49], Мамбетовой Е.А. [50], Пасынкова Д.П. [51] Kosar V. [52] и др. В работах рассмотрены математические модели теплопереноса с рядом существенных допущений, не позволяющих в полной мере описать тепловые процессы в изоляции кабеля. Проведен лишь качественный анализ влияния скорости изолирования и температуры вулканизационной среды на степень завершенности вулканизации в изоляции, а не количественный. Поэтому необходима разработка СППР, которая позволяла бы подбирать скорость перемещения заготовки в изменяющихся условиях внешней среды.

Наличие множества исследований подтверждают актуальность выбранной темы. Однако, на сегодняшний день не определены подходы по определению рациональных режимов работы и методов управления процессом вулканизации кабельной изоляции; не предложены системы поддержки принятия решений; не разработано математической модели процесса вулканизации изоляции кабеля внутри паровой среды с учетом температурно-временной зависимости кинетических параметров вулканизации; не предложено алгоритма адаптивного управления построенного на базе математического моделирования, позволяющего корректировать скорость производственной линии в зависимости от изменяющихся условий вулканизации и свойств изоляции кабеля.

В связи с этим, требуется разработка системы поддержки принятия решений оператора линии непрерывной вулканизации изоляции кабеля.

**Объект исследования** – система поддержки принятия решений оператора линии непрерывной вулканизации кабельной продукции.

**Предмет исследования** – математическое и алгоритмическое обеспечение системы поддержки принятия решений оператора линии непрерывной вулканизации кабельной продукции.

**Цель работы** – повышение стабильности степени завершенности вулканизации кабельной продукции за счет предоставления оператору необходимых рекомендаций СППР, разработанной на основе системного анализа и моделирования процесса вулканизации с учетом процессов тепломассопереноса и кинетики, а также статистической обработки экспериментальных данных.

Достижение поставленной в работе цели предполагает решение следующих **задач**:

1. Разработать концептуальную модель системы поддержки принятия решений оператора линии вулканизации резиновой изоляции кабельно-проводниковой продукции.
2. Создать алгоритмы выбора и коррекции скорости линии вулканизации резиновой изоляции кабельно-проводниковой продукции.
3. Разработать методику получения вулканизационных характеристик из результатов натурного эксперимента.
4. Провести экспериментальные исследования вулканизационных, и теплофизических характеристик различных резиновых смесей.
5. Разработать математическую модель процесса вулканизации изоляции кабельной продукции, позволяющую анализировать распределение температуры внутри изоляционного слоя кабеля и оценивать степень вулканизации слоя изоляции для новых материалов и конструкций.
6. Апробировать разработанную СППР в условиях реального производства.

### **Научная новизна работы:**

1. Разработана новая концептуальная модель системы поддержки принятия решений оператора линии вулканизации резиновой изоляции кабельно-проводниковой продукции, **отличающаяся** от известных наличием двух блоков математического моделирования объекта управления: численного решения системы дифференциальных уравнений, соответствующих известным условиям, и статистического анализа результатов вычислительных экспериментов, что **позволяет** адаптировать СППР к изменяющимся исходным данным.

2. Разработаны новые алгоритмы выбора и коррекции скорости движения процесса вулканизации изоляции кабеля, **отличающийся** использованием осесимметричной математической модели процессов тепломассопереноса и вулканизации изоляции внутри вулканизационной трубы, **позволяющие** адаптивно выбирать режим работы линии как при изменении кинетических свойств резины, так и условий протекания процесса.

3. Предложена оригинальная методика испытаний резиновой смеси и изоляции готового кабеля, **отличающаяся** применением гибридного ротационного реометра и **позволяющая** исследовать вулканизационные свойства резиновой смеси при разных температурах и времени выдержки.

4. Предложена методика расчета вулканизационных характеристик на основе результатов натурального эксперимента, которая **отличается** применением трех параметрического нелинейного регрессионного выражения, **позволяющая** описывать вулканизационные свойства с высокой точностью.

5. Разработана **новая** система поддержки принятия решений оператора на основе математической модели процесса вулканизации изоляции кабельной продукции, **позволяющая** анализировать распределение температуры внутри изоляционного слоя кабеля и оценить степень вулканизации слоя изоляции для новых и существующих материалов и конструкций.

**Теоретическая значимость** работы заключается в разработке оригинальной модели системы поддержки принятия решений оператора линии

непрерывной вулканизации кабельно-проводниковой продукции и реализации математической модели, на основе которой предложены алгоритмы выбора и коррекции скорости линии и расхода экструдера. Представленные алгоритмы позволяют определить величины скорости и расхода экструдера для различных: конструкций кабеля, материалов изоляции, нештатных режимов работы производственной линии.

Предложенная математическая модель, в отличие от существующих описывает процессы тепломассопереноса в среде насыщенного пара и вулканизации внутри вулканизационной трубы. Кинетическая модель учитывает зависимость вулканизационных характеристик от температуры и времени выдержки.

Результаты диссертации использованы при выполнении НИР в рамках гранта РФФИ № 20-31-90045.

**Практическая значимость.** Результаты работы можно использовать на предприятиях, занимающихся производством кабельно-проводниковой продукции со сшиваемой изоляцией. Особенно в тех случаях, когда требуется оперативно выбрать новый режим, внести изменения в конструкцию кабеля, сменить марку материала изоляции, а также учесть возможные падения давления внутри вулканизационной трубы и отклонения в свойствах заготовки в ходе процесса вулканизации резиновой изоляции кабеля.

Предложенная СППР в отличие от существующих позволяет производить выбор скорости линии в условиях изменяющихся внешних и внутренних воздействий.

Результаты работы были использованы компанией ООО «Камский Кабель» при проведении опытно-промышленных испытаний технологии подбора режима работы линии непрерывной вулканизации кабельной продукции.

**Методология и методы исследования.** Исследования проводились при помощи методов системного анализа, теории принятия решений, адаптивного

управления, математического моделирования, статистики, численных и экспериментальных методов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Концептуальная модель системы поддержки принятия решений оператора линии непрерывной вулканизации кабельной продукции (п.5 паспорта научной специальности 2.3.1).

2. Алгоритмы выбора и коррекции скорости линии непрерывной вулканизации изоляции кабеля при изменяющихся исходных данных (п.10 паспорта научной специальности 2.3.1).

3. Осесимметричная математическая модель процессов тепломассопереноса и вулканизации изоляции, влияющих на функционирование линии непрерывной вулканизации изоляции кабельной продукции (п. 5 паспорта научной специальности 2.3.1).

4. Закономерности, установленные в результате статистической обработки численных результатов исследования влияния технологических параметров на величину степени завершенности процесса вулканизации (п.15 паспорта научной специальности 2.3.1).

5. Методика определения степени сшивки резиновой смеси в зависимости от параметров процесса (п. 12 паспорта научной специальности 2.3.1).

**Степень достоверности и апробация работы.** Достоверность результатов подтверждается удовлетворительным согласованием с результатами экспериментальных исследований и численными решениями, полученными с помощью других методов.

Апробация результатов диссертационного исследования обсуждалась на Всероссийской научно-технической конференции: «Автоматизированные системы управления и информационные технологии» (г. Пермь, 17 мая 2018 г); «Автоматизированные системы управления и информационные технологии» (г. Пермь, 3031 мая 2019 г); «Автоматизированные системы управления и

информационные технологии» (г. Пермь, 9–11 июня 2020 г); «Автоматизированные системы управления и информационные технологии» (г. Пермь, 9–11 июня 2021 г); XXI Зимней школе по механике сплошных сред (г. Пермь, 18–22 февр. 2019 г); Актуальные проблемы прикладной математики и механики (Абрау-Дюрсо, 01–06 сентября, 2020 г.)

**Публикации.** По теме исследования опубликовано 9 научных работ в ведущих рецензируемых изданиях, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, в их числе 1 работа дополнительно опубликована на английском языке в переводной версии издания, индексируемого в международной базе цитирования Scopus.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 96 наименований. Общий объем работы 125 страницы, в том числе 51 рисунка, 9 таблиц и 3 приложения.

## ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

### 1.1. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

#### 1.1.1 СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ

С развитием цифровых технологий и подходов к организации и обработке данных все чаще находят применение системы поддержки принятия решения (СППР) [53]. Разработаны СППР для различных отраслей: экономика, строительство, производство и т.д.

Система поддержки принятия решений (СППР) — это информационная система, которая поддерживает деятельность по принятию деловых или организационных решений. СППР обслуживают уровни управления, операций и планирования организации (обычно среднего и высшего руководства) и помогают людям принимать решения по проблемам, которые могут быстро меняться и которые нелегко определить заранее, то есть неструктурированные и полуструктурированные проблемы [54]. Системы поддержки принятия решений могут быть либо полностью компьютеризированными, либо управляемыми человеком, либо комбинацией того и другого. В то время, как ученые воспринимают СППР как инструмент для поддержки принятия решений, пользователи рассматривают ее как инструмент для облегчения организационных процессов.[22] Некоторые авторы [55] расширили определение СППР, включив в него любую систему, которая может поддерживать принятие решений, а некоторые СППР включают компонент программного обеспечения для принятия решений;

СППР, как правило, нацелена на менее структурированные и недостаточно конкретизированные проблемы, с которыми обычно сталкиваются менеджеры высшего звена; СППР пытается объединить использование моделей

или аналитических методов с традиционными функциями доступа и поиска данных; СППР уделяет особое внимание функциям, которые упрощают использование их людьми, в интерактивном режиме. СППР подчеркивает гибкость и адаптируемость к изменениям в окружающей среде и подходе пользователя к принятию решений. СППР включают в себя системы, основанные на знаниях. Правильно спроектированная СППР — это интерактивная программная система, призванная помочь лицам, принимающим решения, собирать полезную информацию из комбинации необработанных данных, документов, личных знаний и моделей для выявления и решения проблем и принятия решений.

### **Классификация СППР**

Существует несколько способов классификации приложений СППР. Не каждая СППР четко вписывается в одну из категорий, но может представлять собой комплекс двух или более архитектур. Холсапл и Уинстон [56] классифицируют СППР на следующие шесть структур:

- ориентированная на текст
- ориентированная на базу данных
- ориентированная на электронные таблицы
- ориентированная на решатель
- ориентированная на правила
- комплексная.

Комплексная СППР — самая популярная; гибридная система, включающая две или более из пяти основных структур [56]

**По типу оказываемой поддержки** СППР, можно разделить на следующие категории [57]:

- Персональная поддержка
- Групповая поддержка
- Организационная поддержка.

Компоненты СППР можно классифицировать как [27]:

- Входные данные: факторы, числа и характеристики для анализа.
- Знания и опыт пользователя: входные данные, требующие ручного анализа пользователем.
- Выходные данные: преобразованные данные, на основе которых генерируются «решения» СППР.
- Решения: Результаты, генерируемые СППР на основе пользовательских критериев.

**По методу решения СППР** разделяют на [58, 59]:

- Экспертные системы, в основе которых лежит ранжированный экспертами по важности набор величин с заданными диапазонами, применяется для оценки вклада каждого влияющего фактора на результат.
- Интеллектуальный анализ данных: при помощи алгоритмов машинного обучения и статистического анализа больших объемов данных осуществляется поиск решения.
- Генетические алгоритмы [60]: используют эволюционные методы для выбора оптимального решения.
- Математические модели: позволяют исследовать поведение объекта при помощи его цифровой модели, что позволяет анализировать влияние различных факторов и помогать в принятии решений.
- Системы опорных решений: на основе ряда алгоритмов и инструментов анализа проблемы и принятия решения осуществляется анализ и предложение решения на основе доступных данных.

**Классификация по степени автоматизации [61]:**

- Интерактивные СППР: взаимодействие с пользователем происходит на каждом этапе принятия решения.
- Квази-автоматические СППР: участие пользователя минимально, требуют лишь небольшие корректировки и контроль внешней системы.
- Полностью автоматические СППР: процессе принятия решения осуществляется без участия пользователя.

**Классификация по областям применения:**

- Финансовые СПП: активно используются для анализа, прогнозирования, оптимизации рисков, рынков, расходов, инвестиций и т.д. в финансовых институтах [62].
- Медицинские СПП [63]: находят свое применение в медицинских учреждениях для вынесения диагноза, предложений по организации лечения, и т.д.
- Промышленные СПП [3, 4, 5, 64]: используются на производстве для оптимизации процессов планирования производства и оптимизации технологических процессов.

Таким образом, можно заключить, что СПП находит все большее применение в промышленности, однако необходимо учитывать особенности промышленного производства и с учетом этого формировать необходимые базы данных по материалам и их характеристикам, конструкциям, оборудованию и существующих технологических ограничениях. Первоначально рассмотрим особенности производства кабельной продукции.

**1.1.2 ПРИМЕНЕНИЕ СПП В КАБЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Особенностью кабельного производства является его относительная непрерывность, так заготовка заданного размера проходит с заданной скоростью до тех пор, пока не закончится сырье или заготовка с предыдущей операции. В ходе производства могут возникать ситуации, когда нарушаются заданные величины, например, толщина изоляции, качество ее вулканизации. Так превышение толщины изоляции приведет к перерасходу изоляционного материала на данной и последующей операциях. Снижение толщины изоляции ниже нормы приведет к тому, что не будет обеспечиваться требуемый уровень диэлектрических характеристик изоляционного слоя, что существенно отразится на возможности эксплуатации. Недостаточная степень завершенности

вулканизации приводит к несоответствию не только диэлектрических, но и механических характеристик.

Поэтому важно оперативно принимать решения по выбору оптимальных величин технологических параметров линии.

Для кабельной промышленности применяются СППР для поддержки принятия экономических и производственных решений [3, 4].

Таким образом, в промышленных СППР необходимо наличие следующих составляющих:

1) Модель технологического процесса, которая позволяет анализировать влияние различных факторов на ход процесса и качество продукта.

2) Накопленная база теплофизических свойств применяемых в производстве материалов.

3) База экспертных мнений или База знаний, построенная на результатах математического моделирования.

4) Так как реализация сложных математических моделей не всегда позволяет провести анализ в режиме реального времени, требуется упрощенная модель, например, регрессионная, которая будет выполнять роль базы знаний при небольших диапазонах изменения входных данных, влияющих на режимы производства.

Так как некоторые производственные процессы могут быть весьма сложными и зависящими от большого числа влияющих факторов, то при разработке промышленных СППР могут возникнуть следующие трудности:

1) Полная математическая модель процесса при численной реализации будет иметь существенное расчетное время, и иметь высокие требования к производительности вычислительной техники, что не позволит применить ее в системе анализа реального времени. Следовательно, необходимо максимально упростить модель, при этом сделав лишь допущения, которые не влияют на конечный результат. Либо, провести серию расчетов в интересующем диапазоне изменения параметров и предложить регрессионную модель процесса.

2) Для моделирования процессов переработки материалов требуется свойства материалов, которые не всегда предоставляются производителем, следовательно, требуется проводить экспериментальное определение теплофизических, кинетических, механических и других свойств материала. Поэтому важно иметь базу свойств различных материалов, с возможностью постоянного добавления новых видов.

## **1.2. ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ: ТИПЫ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ (ВИДЫ, СОСТАВ)**

При производстве кабелей Первоначально рассмотрим основные виды материалов, используемых при изготовлении изоляции.

Основным изоляционным материалом для гибких кабелей является резина.

Резина – это многокомпонентная смесь на основе синтетического или натурального каучука, доля которого составляет до 50%. Оставшуюся часть составляют наполнители, пластификаторы, защитные добавки, вулканизирующие агенты и т.д. В сыром виде резина - это пластичный материал.

Для повышения механических характеристик резины применяют технологию образования поперечных междумолекулярных связей, данный процесс носит название вулканизация для резиновых смесей и сшивка для полимерных композиций.

Процесс вулканизации резины происходит при повышенной температуре, начало процесса обычно происходит в диапазоне температуры (140-150) °С, за исключением резин на основе кремнийорганического каучука. При этих температурах начинает интенсивно протекать химическая реакция между молекулами каучука и вулканизирующего агента, в результате чего формируются межмолекулярные связи. В ходе вулканизации резина из термопластичного состояния переходит в термореактивное.

Скорость протекания реакции вулканизации сильно зависит от температуры и типа вулканизирующего агента, что отмечают авторы в своих работах.

В кабельной промышленности используют резины следующих типов: изоляционные и шланговые.

Кабели с резиновой изоляцией применяются для передачи электрической энергии подвижным установкам, а повышенная гибкость позволяет проводить прокладку с меньшими усилиями и радиусами изгиба кабеля. Резиновую изоляцию применяют для кабелей на напряжение не более 10 кВ. Резины для кабельной промышленности должны сохранять свои химические, механические и диэлектрические характеристики весь срок эксплуатации кабеля.

Резины, применяемые в кабельной промышленности, нормируются стандартом [53]. Резины разделяются на изоляционные РТИ-0,1,2, изоляционные не распространяющие горение РНИ, а также шланговые РШ-1. Стандарт определяет количественное содержание каучука в смеси (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Содержание каучука в различных типах резины

Кабельная изоляционная	Кабельная шланговая
РТИ-0,1,2 , РТИШ –на основе 40%, 33%,30 % натурального или изопренового каучуков РНИ - на основе 35% полихлоропренового каучука, не распространяющего горение РТЭПИ-1 -на основе 30% этиленпропиленового каучука РТСИ-1 -на основе силоксанового каучука	РШ-1,2 на основе 50%, 40% натурального или изопренового каучуков РШН-1, РШН-2 на основе 50%, 40% маслостойкого, не распространяющего горение каучука РШМ-22 на основе 40% Морозостойкого каучука.

Различают два вида каучука по происхождению» натуральный и синтетический (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Типы и марки каучуков

Типы каучука	Марки каучука
Натуральный	НК
Бутадиеновый	СКБ, СКБМ, СКД, СКС, СКМС
Бутадиен-нитрильные	СКН
Этиленпропиленовые каучуков	СКЭП
Силонольные (кремнийорганические)	СКТ,СКТВ

Каждый из видов имеет свои параметры и термомеханические и химические особенности.

### 1.3. АГРЕГАТЫ ДЛЯ ВУЛКАНИЗАЦИИ

С точки зрения разработки СППР важно учитывать особенности технологического процесса и возможности технологического оборудования.

Для производства кабельных изделий с вулканизированной резиновой изоляцией используют специальные агрегаты. Вулканизация изделий может осуществляться как прерывным методом, так и непрерывным.

При первом методе изолированную токопроводящую жилу (заготовку), находящуюся на барабане или специальной таре помещают в котел, где в паровой среде при давлении 3 -20 атмосфер выдерживают в течении времени, необходимого для осуществления процесса вулканизации.

Во втором методе вулканизация происходит в вулканизационной трубе длиной порядка 80 м, соединенной с экструзионным оборудованием посредством специального затвора. Труба может быть трех типов, горизонтальная, вертикальная, наклонная.

Горизонтально расположенные трубы применяются на производстве малых маркоразмеров кабелей, где провисание за счет собственного веса кабеля

минимально и не достигает величин, при которых происходит контакт слоя резины и стенки трубы.

Агрегаты с вертикальным расположением не получили широкого распространения из-за необходимости постройки высоких производственных помещений.

Наиболее широко распространены являются агрегаты или линии непрерывной вулканизации наклонного типа (рис. 2), где геометрия трубы повторяет линию провиса кабеля. Экструзионное оборудование устанавливается на высоте порядка 5 м над уровнем пола. После наложения слоя резины изделие проходит внутри вулканизационной трубы, где находится пар под давлением порядка 17–20 атмосфер, температура пара при таком давлении составляет порядка 204–212 °С. После вулканизационной трубы изделие попадает в анклав с водой и перемещается под давлением 6–8 атмосфер по трубе с водой, где охлаждается до температуры порядка 60 °С, а затем сушится, испытывается аппаратом сухого испытания и наматывается на барабан

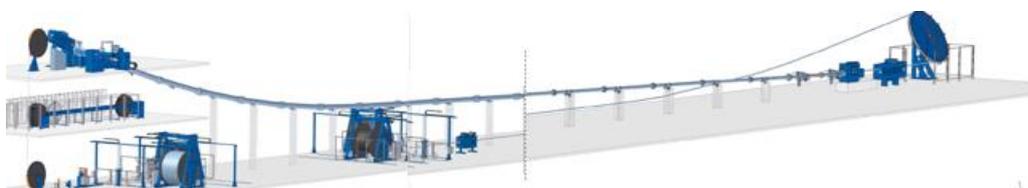


Рисунок 1.2 – Агрегат непрерывной вулканизации наклонного типа

Далее рассмотрим основные методы вулканизации, применяемые в кабельном производстве.

#### **1.4. СПОСОБЫ ВУЛКАНИЗАЦИИ**

Рассмотрим основные методы вулканизации кабелей с резиновой изоляцией.

##### **1. Вулканизация за счет нагрева стенок формы**

Данный метод вулканизации применяется при прерывных методах вулканизации, литье под давлением и интенсификации вулканизации в гидравлических прессах при температуре 180-240 °С.

Превышение температуры может привести к резкому снижению качества пространственной вулканизационной сетки резин на основе натуральных каучуков, растет расход серы (вулканизирующего агента) на модифицирование молекулярных цепей каучука в ущерб образованию пространственных междумолекулярных связей.

## **2. Вулканизация в воздушной среде заданной температуры**

Активно применяется для процесса непрерывной вулканизации шприцованных изделий в туннельных и камерных аппаратах при следующих условиях: в среде воздуха при температуре 200-320 °С и атмосферном давлении. Данный метод применим для второй стадии вулканизации изделий, что способствует улучшению их эксплуатационных характеристик.

Из недостатков можно отметить пониженный коэффициент теплопередачи, низкое качество шивки, снижение эксплуатационных характеристик для резин на основе непредельных каучуков из-за процесса термодеструкции.

## **3. Вулканизация в псевдосжиженной среде**

Используется для непрерывной вулканизации шприцованных изделий в Псевдосжиженная среда - стеклянные шарики или частицы кварцевого песка диаметром 0,15 - 0,3 мм, расположенные в камере в виде взвеси, поддерживаемой потоком горячего воздуха нагретого до температуры 150 - 250 °С

Данный метод применяется для полых резиновых изделий с профилем сложной конфигурации.

## **4. Вулканизация в среде соляного расплава**

Применяется при непрерывной вулканизации изделий в среде расплава солей, при этом величина температуры расплава находится в диапазоне 170-300°С.

Преимущества данного метода

Повышенная теплоотдача от расплава к изделию способствует снижению времени нагрева заготовки, следовательно, увеличивается скорость вулканизации, а также отсутствует контакт с кислородом, что предотвращает термическое окисление.

Из недостатков стоит отметить потерю теплоносителя за счет того, что он частично остается на поверхности изделия, поэтому возникает необходимость восстановления его объема в камере.

## **5. Вулканизация в высокочастотном электрическом поле**

Данный метод основан на выделении тепла за счет эффекта поляризации полярных молекул резины в электрическом поле высокой частоты.

Данный метод применим для резиновых смесей, содержащих полярные каучуки (бутадиен – стирольный, хлоропреновый, и т.д.) и такие составляющие как печной технический углерод.

## **6. Динамическая вулканизация**

Данный тип вулканизации характерен для термопластичных резин.

В ходе высокоскоростного смешивания резиновой смеси с эластомером происходит полная или частичная вулканизация резиновой смеси. В результате чего получают материалы со свойствами термоэластопластов (ТЭП), где частицы вулканизированной резины, равномерно распределены в расплаве термопласта.

Величина температуры, при которой происходит процесс смешивания, зависит от материала эластомера, так для полипропилена 185-190 °С, а для полиэтилена 160-180 °С.

Отметим, что для формирования базы данных СППР, что требует проведения экспериментов и применения специализированных методов.

## **1.5. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВУЛКАНИЗАЦИИ**

В ходе процесса вулканизации происходят не только структурные изменения резиновой смеси, но и ряд реакций, в ходе которых выделяется и

потребляется энергия. Кроме того, при вулканизации происходит распад катализатора, сопровождающийся выделением летучих веществ, при этом масса резиновой смеси уменьшается.

В связи с тем, что процесс вулканизации сопровождается эффектами, описанными выше оценить протекание данного процесса можно несколькими методами.

### **1. Разрывная машина**

Наиболее простым является метод определения механического напряжения материала на разрывной машине.

Испытание проходит следующим образом:

- 1) Образец выдерживают при определенной температуре заданное время в греющей камере, затем выдерживают при комнатной температуре до полного охлаждения.
- 2) Проводят серию испытаний на разрывной машине по определению механических характеристик.
- 3) Проводят сравнение результатов для разных температур и времен выдержки.
- 4) По величине удлинения определяют сшит материал или нет.

### **2. Динамический механический анализ (ДМА).**

Данный метод позволяет одновременно нагревать образец и прикладывать к нему осциллирующую нагрузку, при этом измеряя его механические параметры. При этом, благодаря разной оснастке оборудования можно прикладывать несколько видов нагрузки: разрыв, сжатие, изгиб, сдвиг.

Испытание проходит следующим образом:

- 1) Образец помещают в зажимы оборудования ДМА.
- 2) Выбирают температуру испытания и время его выдержки.
- 3) Прикладывают осциллирующую нагрузку определенной амплитуды и частоты.
- 4) Для разных образцов получают семейство кривых зависимости механических свойств от времени выдержки при определенной температуре

5) Анализируют результаты и получают параметры вулканизации.

Частота и амплитуда нагрузки определяется предварительным экспериментом, где происходит поиск диапазона величин нагрузки, при которой не происходит необратимой деформации.

### **3. Реометрия**

Ротационные реометры позволяют прикладывать осциллирующую нагрузку на образец. Рабочими поверхностями являются площадки в виде дисков, поверхность которых может иметь следующих типов: плоскость - плоскость, плоскость – конус, и т.д. Вариация форм оснастки позволяет испытывать материалы с различными свойствами. Еще одним немаловажным фактом является то, что нагрев образца осуществляется рабочими поверхностями, что позволяет равномерно нагревать образец во время испытания.

Испытание проходит следующим образом:

- 1) Образец помещают между рабочих поверхностей.
- 2) Нагревают образец до температуры размягчения и сжимают до достижения определенной толщины, убирают образовавшиеся излишки материала за пределами рабочих плоскостей.
- 3) Нагревают образец до температуры испытания.
- 4) Прикладывают осциллирующую нагрузку определенной амплитуды и частоты.
- 5) Для разных образцов получают семейство кривых зависимости механических свойств от времени выдержки при определенной температуре
- 6) Анализируют результаты и получают параметры вулканизации.

### **4. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК)**

Дифференциальная сканирующая калориметрия применима к тем реакциям вулканизации, где ярко выражен тепловой эффект фазового перехода. Например, при исследовании сшивки эпоксидных смол.

Основа метода – нахождение разницы тепловых потоков у сравнительной и испытательной ячеек при нагревании с определенной скоростью. При достижении образцом температуры, при которой начинается какая-либо реакция или фазовый

переход происходит поглощение (эндотермическая реакция) или выделение тепла (экзотермическая реакция).

В результате эксперимента получается зависимость величины теплового потока от температуры ячейки с образцом. По характеру кривой данной зависимости можно судить о протекавших процессах в ходе нагрева или охлаждения материала образца.

### **5. Термогравиметрический анализ (ТГА).**

Основой термогравиметрического анализа является точное взвешивание навески материала образца, которая подвергается нагреву с заданной скоростью. При достижении температуры термического разложения компонентов материала происходит потеря массы, которая фиксируется точными весами.

В результате эксперимента получается зависимость процентов массы навески от температуры образца. По этой зависимости возможно определение количества компонентов в материале образца. При наличии данных о составе материала возможно установить количественное содержание каждого из компонентов.

## **1.6. ПОДХОДЫ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ВУЛКАНИЗАЦИИ**

Наиболее разработанными в мировой технической научной литературе являются проблемы теплопереноса с процессами вулканизации резиновых композиций для крупногабаритных изделий, чаще всего автомобильных или транспортных шин и гуммированных изделий, представляющие собой многослойные изделия с резиновым покрытием.

Проблемам теплопереноса с учетом вулканизации при производстве кабелей с резиновой изоляцией посвящено незначительное количество работ. Однако широкий ряд вопросов, касающихся процессов теплопереноса, кинетических параметров и их математического описания, влияние рецептур резиновых смесей и величин теплофизических характеристик, условий неизотермической кинетики и их влияние на протекание процесса вулканизации

широко перекликаются для всех технологических процессов, связанных с процессом вулканизации [27].

В работах [3, 18, 32, 66] для описания процессов теплопереноса и вулканизации резины использовались одномерные нестационарные модели

Осиповым С.Ю. с авторами в [8] рассмотрены процессы тепломассопереноса для технологии производства материалов с резиновым покрытием. Приведены аналитические и численные решения одномерного нестационарного уравнения теплопроводности для двухслойной бесконечной пластины. Рассмотрены процессы изотермической и неизотермической вулканизации.

В [6] рассмотрена модельная многослойная конструкция автомобильной шины. В результате реализации нестационарной одномерной математической модели теплопроводности с внутренним источником тепла, построены поля температур, определены кинетические параметры процесса вулканизации в многокомпонентном изделии. Отмечено, что существенное влияние на процесс вулканизации и время завершения процесса имеет состав компонентов в исходном композите. В ряде случаев результаты моделирования существенно отличаются от экспериментальных данных. Как и в ряде других работ, отмечается, что экспериментальное определение температур, проводимые с помощью термопар, расположенных в особых точках сложной геометрии шин, трудоемки и дорогостоящи, поскольку для каждого эксперимента должно быть повреждено, по меньшей мере, резиновое изделие.

В статье [67] рассматривается процесс вулканизации полимерной композиции тонкой пластины, 20мм в одномерной постановке.

Моделированию нагрева плоского образца резины между двумя плитами посвящена работа [68]. Проведен анализ теплового поля исследуемой области, построены поля температур для разных времен сшивки.

Марзокка [69] разработал одномерную модель конечных элементов для моделирования процесса отверждения в резиновом цилиндре. Кинетическая реакция рассматривалась, как реакция первого порядка.

Аналогичная задача для пластины в 50 мм приведена в работах [43, 44].

Недостатком подобных подходов было слишком упрощенная геометрия в сравнении с геометрией достаточно сложной шинной конструкции.

Хан и соавторы [70] разработали двумерную осесимметричную конечно-элементную модель для моделирования процесса отверждения шин. Была рассмотрена сложная геометрия шины, форм и камер, рассматривались изменяющиеся во времени граничные условия, сложная модель кинетики вулканизации. Численные результаты (значения температур в характерных очках) сравнивались с экспериментальными измерениями. Получено удовлетворительное соответствие.

В [11] рассматривалась задача теплопереноса в условиях сшивки резиновой подложки на тканевом слое в двумерной нестационарной постановке. В силу того, что в полимерной композиции сера присутствовала в малом объеме, в уравнении теплопроводности тепловыделения кинетической реакции не учитывались.

С развитием компьютерной техники усложнялись математические модели и широко использовался метод конечных элементов для их реализации.

Авторами [38] приведено численное и экспериментальное исследование процесса вулканизации с использованием дробной модели кинетики в двумерной нестационарной постановке процесса теплопереноса. Модельная область задавалась в виде таблетки 3 см\*10см. В работе описана лабораторная установка для анализа процесса сшивки, позволяющая во времени анализировать температуры в 3 точках конструкции. Приведено сравнение численных и экспериментальных результатов. По температуре различия составляют единицы процентов, по степени сшивки более 20%

С.Г. Тихомировым Ю.В. Пятаковым в [29] представлена двумерная нестационарная математическая модель задачи теплопроводности в

вулканизированном изделии (пневматическая шина, представляющая собой многослойную конструкцию) с учетом зависимости теплопроводности материалов слоев от температуры в условиях неизотермической вулканизации. Численная реализация осуществлялась методом конечных разностей с использованием явных разностных схем. Получены температурные поля, степень завершенности вулканизации в шине в различные моменты времени.

Оценка степени завершенности процесса вулканизации осуществляется по рассчитанному эквивалентному времени вулканизации для значения температуры, принятой в качестве эквивалентной. Отмечено, что для определения оптимального режима вулканизации приставленный алгоритм является неотъемлемой и важнейшей составляющей частью.

С двумерными моделями работал широкий ряд авторов, [25, 30, 45, 18, 71, 52] результаты исследований которых не приносили существенной новизны и не изменяли величину погрешности моделей в сравнении с экспериментами.

В работе [13] рассмотрен процесс вулканизации пневматических шин. Разработана трехмерная нестационарная математическая модель тепломассопереноса для сложной пространственной конструкции шины, на основе которой построена модель кинетической реакции. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами натуральных экспериментов. В работе проведено сравнение предложенной модели с одномерными математическими моделями, показана ограниченная возможность их применения.

Существенный вклад в развитие цифровых моделей процесса вулканизации автомобильных шин внесли M.H.R. Ghoreishy, G. Naderi в работах по трехмерному моделированию процесса сшивки резины [22, 27]. Было показано, что игнорирование потока в третьем направлении (или решение тепловой задачи в двух или одном измерении) приведет к значительным ошибкам в прогнозировании температуры и степени реакции отверждения для сложных резиновых изделий, таких как шины с рисунком протектора

В исследовании [34] представлено численное моделирование процесса отверждения резинового изделия в процессе литьевого формования с использованием нестационарного уравнения уравнений Навье-Стокса. В работах наиболее полно отражены особенности вулканизации резиновых крупномасштабных изделий (автомобильных шин). Отмечено, что в разных областях конструкции скорость вулканизации существенно различна, что требует использования кинетической модели с разными порядками, поэтому в работе порядок реакции  $n$  в модели Камеля [29] представлялся в виде полинома, зависящего от температуры. В работе показано существенное отличие результатов, полученных по предложенной трехмерной модели и результатов для упрощенных в двух и одномерных постановках. Расхождение результатов по степени сшивки для предложенной модели с экспериментальными данными, полученными с помощью реометра, составило 9,6%, для модели Камеля – 16,3%

В [52] приведено математическое моделирование процесса сшивки резиновой изоляции силового кабеля. Представлены зависимости температуры слоев по длине трубы, степени сшивки по длине и радиусу изделия.

В работе [78] проведено моделирование впрыска и вулканизации акрилатного наполнителя для пористых костей. Полученная модель позволяет получать температурные поля исследуемой модели, напряжение, возникающего при сшивке, зависимость степени сшивки от времени выдержки.

В. А. Ищенко, М. В. Шаптала в [14] рассмотрена трехмерная математическая модель теплопереноса с учетом вулканизации резиновых изделий с геометрически сложными поверхностями нагрева.

Методом решения выбран метод конечных элементов. Отмечено, что в отличие от подходов, использующих метод однородной неограниченной пластины (рассматривается эквивалентный слой и одномерная постановка), приведенной пластины (одномерная постановка без усреднения теплофизических характеристик) или метода плоского сечения (плоская постановка задачи, учитывающая особенности протектора шины и выбирается сечение наиболее

трудно прогреваемое трехмерная постановка задачи позволяет учитывать сложную пространственную геометрию шин, различные начальные температурные условия. Сравнение по времени вулканизации для одномерной, двухмерной и трехмерной постановок показало отличие на 15% в первом случае и 6% во втором. Учет внутренних источников тепла от кинетической реакции уменьшил время вулканизации (трехмерная математическая модель) на 3%

Для исследования процесса вулканизации внутри автоклава авторами [12] была предложена математическая модель процесса тепломассообмена внутри автоклава между паром и изоляцией кабеля на базе аналитического метода. Получены величины расхода пара и время выдержки кабеля в автоклаве.

Существенное влияние на получаемый результат при исследовании процесса вулканизации оказывает подход для описания кинетики процесса, кинетическая модель.

Приведенная в [38] кинетическая двухпараметрическая модель, в отличие одностадийной ранее применяемой, использована широким рядом авторов [79**Ошибка! Источник ссылки не найден.**, 22, 27, 34, 80]

Авторами[25, 23, 21, 81**Ошибка! Источник ссылки не найден.**, 76**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] для моделирования процесса вулканизации различных крупногабаритных резиновых изделий использовалась модифицированная модель кинетики, предложенная в [29]

Кроме того, Kamal et al. [30] расширили идею использования двух параметров для порядка реакции ( $m$ ,  $n$ ) до использования двух констант скорости и предложили новую кинетическую модель.

В работе [82] авторы проводят сравнение результатов использования кинетической модели Камала [29] и предложенной модифицированной модели с результатами эксперимента с использованием реометра для процесса, протекающего при температуре 155 °С. В работе отмечено, что поскольку стадия ревулканизации после окончания процесса вулканизации обычно оказывает нежелательное влияние на качество и физические свойства конечного продукта,

становится необходимым оптимизировать процесс отверждения [75] с целью обеспечения необходимого времени вулканизации и не допущения его существенного увеличения.

Schuppner V. [83] исследовал влияние параметров среды вулканизации на величину коэффициента теплоотдачи на поверхности изделия.

Моделированию процесса вулканизации при формовке резины посвящена работа Fei Shi и Xianghuai Dong [71] где представлена трехмерная модель тепломассопереноса при неизотермическом процессе заполнения и вулканизации внутри формы.

Параметрами, влияющими на распространение тепла в резиновых изделиях являются теплофизические характеристики материалов и их зависимость от температуры.

В стандарте [84] описана стандартная методика получения вулканизационных кривых для резиновых смесей на безроторных реометрах.

Minako H. [85] проведен обзор основных методик испытания резиновой продукции, применяемых исследователями. Приведены основные виды резины, катализаторов вулканизации, наполнителей и др. Проведен анализ методик для различных типов резин, указаны возможности каждого метода и недостатки.

Изучению процесса вулканизации бром-бутиловых каучуков, сшитых бисмалеимидом посвящена статья Dhanya P [86Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Рассмотрена методология подготовки образцов, испытания, оценки результатов. Проведен анализ химической кинетики процесса вулканизации.

В работах Milani [5, 31, 32, 33] описывает экспериментальное исследование процесса вулканизации, а также численное моделирование реологических кривых при помощи регрессивного анализа. В ходе работы были получены вулканизационные кривые для нескольких температур и размеров образца. По результатам эксперимента с помощью регрессивного анализа было получено уравнение, описывающее кинетику процесса. Разработана математическая модель

процесса тепломассопереноса внутри вулканизационной трубы линии изолирования сшитым полиэтиленом.

Ganapathi A.S. в статье [87] описывает исследование зависимости вулканизационных свойств композита от температуры и давления. Приведена математическая модель исследуемого объекта. Получены картины температурных полей и распределения давления внутри образца, а также графические зависимости скоростей движения резиновых частиц внутри объекта.

Экспериментальному исследованию процесса вулканизации эпоксидных резин посвящена статья [88] Испытание проводилось на дифференциальном сканирующем калориметре (ДСК). По полученным результатам определялась степень вулканизации и её зависимость от времени сшивки.

Источник [38] посвящен математическому моделированию физико-химических свойств при сшивке изоляции многожильных кабельных изделий. Проведено численное исследование модели кабеля в цилиндрических координатах. Приведены зависимости времени сшивки изоляции и температурные поля кабельного изделия.

Математическому моделированию кинетики процесса вулканизации посвящены работы [39-41]. Вулканизация рассмотрена как многостадийный процесс, с различными скоростями на каждой из стадий. Полученная модель позволила с достаточной точностью получать реометрические кривые для исследуемых образцов.

Ряд экспериментальных работ показал, что присутствие различных ингредиентов в полимерной композиции (резинах) и их сложное взаимодействие, приводит к нелинейной зависимости теплофизических характеристик от температуры. Исследованию этих задач посвящен широкий круг работ [80, 6, 89, 76] где для описания удельной теплоемкости, теплопроводности и плотности использовались различные подходы.

Результаты работ показали, что полимерная основа и содержание наполнителя оказывают наибольшее влияние на теплофизические

характеристики, в то время как степень вулканизации существенно не изменяет зависимость теплопроводности от температуры.

Рафей и др. [28, 1] определили величину теплопроводности смеси натурального каучука, наполненной сажей с помощью обратного метода и использовали полученные данные для моделирования процесса отверждения толстого резинового изделия.

Анализу теплофизических свойств натурального каучука с добавлением сажи посвящены работы [90, 91, 92, 93, 94]. Исследования показали, что как теплопроводность, так и коэффициент диффузии соединений, наполненных углеродной сажей, падают с ростом температуры с относительно линейной зависимостью. При этом величины плотности и удельной теплоемкости продукта изменяются мало. Они также обнаружили, что увеличение загрузки сажи также увеличивает наклон снижения теплопроводности с ростом температуры. Другими словами, более высокое содержание сажи увеличивает чувствительность теплопроводности к изменению температуры.

Sircar et al. В работе [93] также изучалось влияние указанных параметров на изменения теплопроводности как отдельных, так и смешанных каучуков, и были получены аналогичные результаты. Они впервые использовали DSC (дифференциальная сканирующая калориметрия) для определения теплопроводности.

Kong et al. [45] изучали влияние различных типов и количества технического углерода, содержания масла, концентрации серы и двух не черных наполнителей (глина и порошок алюминия) на теплопроводность ряда резиновых смесей. Аналогичные результаты и тенденции были найдены в соответствии с предыдущими публикациями.

Поскольку низкая температуропроводность резин приводит к существенной неоднородности температурного поля в любом изделии, а, следовательно, к неоднородности степени сшивки внутри изделия, то для определения эффективного времени сшивки необходимо с использованием методов

математического моделирования решать задачи оптимального управления такого технологического процесса.

Прогнозирование качества готовой продукции автомобильных шин проведено в работе [6]. Моделирование процесса производится при помощи нейронной сети, которая обрабатывает входные данные и в результате выдает прогнозируемый показатель качества.

В [9] проведен анализ методов оптимизации и алгоритмов для прогнозирования тепловых режимов при вулканизации гуммированных (слоистых) резиновых изделий. Рассмотрены градиентные методы для решения задач оптимизации и управления объектами с распределенными параметрами. Регулирование осуществляется изменением температуры внешней среды, что для большинства задач управления процессом вулканизации изоляции кабелей затруднительно.

Павлов В.В. с соавторами в работе [9] предложил методику оптимизации температурных режимов вулканизации многослойных гуммированных изделий. В работе многослойное изделие заменено на однослойную неограниченную пластину с эффективными теплофизическими характеристиками. В работе сделана попытка учесть неизотермическую вулканизацию при этом отмечено, что для уточнения получаемых результатов необходимо решать более сложную задачу теплопереноса с использованием метода конечных элементов.

Метод регулирования процессом вулканизации аналогичен предыдущей работе.

В статье [95] рассмотрен процесс оптимизации и корректировки режимов процесса вулканизации листового резинометаллического изделия. Здесь управляющим воздействием является продолжительность процесса, выходным параметром – степень вулканизации, основными возмущающими воздействиями – отклонение вулканизационных параметров. Для экспериментального исследования температурного поля в изделии была создана лабораторная установка. Экспериментальное исследование показало существенное различие

температур внутреннего и внешнего слоев в резиновом покрытии, что приводило к различной степени вулканизации и отличию в механических свойствах изделия. Управление процессом вулканизации предложено проводить по температуре наименее нагретого слоя, а температурное поле определять с помощью конечно-разностных моделей.

С.Ю.Осиповым с соавторами в [18] отмечено, что низкая теплопроводность резин приводит к существенно градиентному полю температур в гуммированном (слоистом) изделии. Улучшение качества изделия (достижения однородной степени вулканизации в изделии) и сокращение времени вулканизации возможно при управлении и выборе рационального режима термокинетического процесса.

В работе использована теория линейных непрерывных систем для синтеза адаптивной дискретной системы автоматического управления. Оптимизация параметров осуществлена на основе критерия максимальной степени устойчивости. Температурное поле в изделии получено в результате реализации задачи одномерной нестационарной теплопроводности с постоянными коэффициентами. Отмечено, что для удовлетворительных результатов управления процессом необходимо использовать более сложные математические модели кинетики и теплопередачи для определения наиболее и наименее нагретых слоев, что позволит избежать, с одной стороны, перевулканизации, где материал нагревается достаточно быстро, с другой, недовулканизации, где температура материала еще низка.

В работе [15] отмечено, что автоматизация и управление процессом вулканизации гуммированных изделий не возможна без обширной базы данных, касающихся химических и физических явлений, свойств и характеристик материалов и изделий. В отличие от работы [17] здесь рассмотрена двухслойная конструкция резина-ткань, учитывается неидеальный тепловой контакт на границе двух сред. Рассмотренные уравнения теплопроводности для каждого из материалов – одномерные нестационарные. Численное решение задачи позволило

получить температурные поля и степень вулканизации при неизотермической реакции вулканизации и изотермической, когда изделие достигло значения температуры окружающей среды. Определено время вулканизации для различных стадий кинетического процесса. В результате проведенных исследований в работе определена последовательность задач, позволяющих разработать структуру системы автоматизированного проектирования тепловых режимов и теплообменных аппаратов для вулканизации гуммированных материалов.

Анализу и математическому описанию процессов тепломассопереноса и вулканизации при производстве кабелей с резиновой изоляцией посвящен небольшой круг работ. Отличительной особенностью такого процесса является наличие реагента (в виде пароводяного газа, азота), который находится под давлением в вулканизационной трубе, где за счет его движения необходимо учитывать конвективный механизм переноса тепла и рассматривать кроме уравнений энергии уравнения движения и несжимаемости для газовой среды.

Анализу процессов тепломассопереноса с кинетической реакцией в вулканизационной трубе посвящены ряд работ.

Г.В. Кузнецовым, и Е.В. Ивановой в [36] предложена одномерная нестационарная математическая модель процессов тепломассопереноса с реакцией вулканизации изоляции кабелей в среде азота (температура среды 500 °С, в отличие от пароводяной среды – 200°С). Приведено сравнение результатов решения в декартовой (бесконечная пластина) и цилиндрической системе координат. Определено влияние лучистой энергии, параметров кинетической реакции и формы изделия на кинетические параметры.

В работе [5] рассмотрен процесс вулканизации в азоте изоляции кабеля на высокое напряжения. Предложен алгоритм для определения оптимальных параметров производственной линии с целью увеличения выходных механических характеристик резины. Температура азота и время выдержки резины предполагаются как оптимизируемые производственные параметры, тогда как предел прочности при растяжении вулканизированной резины

рассматривается как целевая функция. Математическая постановка задачи теплопереноса с реакцией вулканизации ограничена рассмотрением одномерного нестационарного уравнения теплопроводности в качестве кинетического уравнения использовалось уравнение Аррениуса. В работе получены зависимости предела прочности резиновых образцов, полученных после процесса вулканизации от времени и температуры вулканизации. Недостатком работы является отсутствие подтверждения адекватности рассмотренных моделей, упрощенная модель кинетики и сложность в оперативном определении качества получаемой продукции и, следовательно, эффективной реализации целевой функции.

В работе [35] моделируется процесс вулканизации изоляции кабеля в вулканизационной трубе.

Целью работы являлось разработка нестационарной осесимметричной математической модели процессов тепломассообмена в канале единичной длины с учетом кинетических реакций и определение влияния теплофизических и кинетических параметров на величину сшивки. В отличие от модели [36], учитывается движения кабеля в нагревательной камере метровой длины. Задача решалась методом конечных разностей. Были получены зависимости времени завершения процесса вулканизации от величин теплофизических характеристик, кинетических параметров и температуры верхней границы камеры.

Установлено, что даже относительно небольшие (15%) ошибки в численных значениях кинетических параметров полимеризации могут привести к значительным (до 30%) отклонениям интегральных характеристик этого процесса (в отличие от теплофизических характеристик изоляционных материалов, действие которых достаточно смягчено).

В отличие от [22] и [26] Рафей и др. в работе [28] получили температурные зависимости теплофизических характеристик резины от температуры и степени сшивки, используя программный комплекс Abaqus и использовали модифицированную модель Камала и Сурура.

## 1.7. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1. Описаны основные особенности применения СППР в кабельной промышленности, что позволило установить необходимые компоненты СППР оператора и технолога, отвечающих за процесс вулканизации изоляции кабельной продукции. Показано, что эффективной работы СППР необходимо сформировать необходимую базу данных, включающую основные типы материалов и их характеристики, применяемое оборудование и технологии изготовления кабельной изоляции, включая основные способы вулканизации.

2. Рассмотрены основные типы резины, применяющейся в кабельной промышленности, отражены типичные области применения.

3. Представлены основные способы вулканизации.

4. Рассмотрены методы экспериментального исследования процесса вулканизации, что позволило выбрать метод для данного исследования.

5. Рассмотрены труды отечественных и зарубежных ученых, посвященные подходам к исследованию кинетики процесса вулканизации резины, математическому моделированию процессов теплопереноса и вулканизации, а также подходам к оптимизации процесса.

6. Обнаружено, что большинство исследований посвящено процессу вулканизации крупногабаритных изделий, который существенно отличается от процесса непрерывной вулканизации кабельно-проводниковой продукции.

## ГЛАВА 2. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ОПЕРАТОРА ЛИНИИ НЕПРЕРЫВНОЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ

Процесс вулканизации изоляции кабелей существенно зависит от ряда технологических, физических и геометрических параметров, которые находятся в различной степени взаимосвязи. Выбор подходящей скорости изолирования не

очевиден, данная задача выбора является когнитивно-сложной, оператору необходимо знать и учитывать физико-химические процессы вулканизации и кинетические свойства резины.

В ходе производства кабелей с вулканизированной изоляцией возникает проблема нестабильности величины давления пара в вулканизационной трубе, что обусловлено резкими перепадами давления при одновременном включении ряда линий вулканизации. Аналогичный вопрос возникает при запуске в производство новых марок, с измененной геометрией и материала ТПЖ и изоляции.

Процесс вулканизации начинается при нагреве изоляции выше  $140^{\circ}\text{C}$ , скорость процесса значительно зависит от температуры. Нагрев происходит не равномерно в радиальном направлении, поэтому наружные слои изоляции достигают максимальной температуры значительно раньше слоев близ ТПЖ. Поэтому, при расчете технологического режима важно подобрать такую скорость перемещения заготовки, при которой внутренние слои на выходе из вулканизационной трубы имели бы достаточную степень сшивки.

Для расчета оптимальных технологических параметров необходимо учесть несколько факторов:

- конструктивные особенности изделия,
- вулканизационные свойства резиновой смеси,
- теплофизические процессы, происходящие внутри вулканизационной трубы.

Для получения вулканизационных характеристик используется метод, описанный в работе [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**], где после серии реологических испытаний резиновой смеси получено семейство кривых зависимости степени завершенности процесса вулканизации от времени при разных температурах. Результаты эксперимента преобразованы в параметрическое уравнение, позволяющее вычислять итоговую степень завершенности процесса при известной кривой нагрева слоя изоляции.

Разработанная математическая модель процессов тепломассообмена и кинетики вулканизации позволяет оценить влияние на степень завершенности вулканизации различных факторов: конструктивные размеры кабеля, температура среды вулканизации (давление в вулканизационной трубе), теплофизические характеристики жилы и изоляции кабеля, вулканизационные параметры материала изоляции, линейная скорость кабеля.

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет анализировать процесс вулканизации и определять необходимые параметры технологического режима для новых конструкций кабеля и материалов изоляции с новыми свойствами или в случае перехода к нестандартным технологическим параметрам процесса. Последнее возникает при необходимости производства одновременно на 2-х и более линий, что приводит к существенному падению давления в вулканизационной трубе.

## **2.1 СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**

Система поддержки принятия решения базируется на математической модели технологического процесса непрерывной вулканизации изоляции кабеля, базы данных и алгоритма коррекции режима.

В работе предложена следующая структурная модель СППР (рис. 2.1)

С СППР первого уровня взаимодействует технолог. Он отвечает за разработку технологической карты для каждого маркоразмера кабеля. В систему анализа поступает запрос о геометрии и материале заготовки. Если отличия только в геометрии, то геометрические параметры заносятся в базу данных (база геометрии) и при переходе к решателю выбирается упрощенная модель, определяется новый режим. Новый режим записывается в базу режимов. В случае если применен новый материал происходит перерасчет режима при помощи дифференциальной математической модели (полная модель). База режимов пополняется.

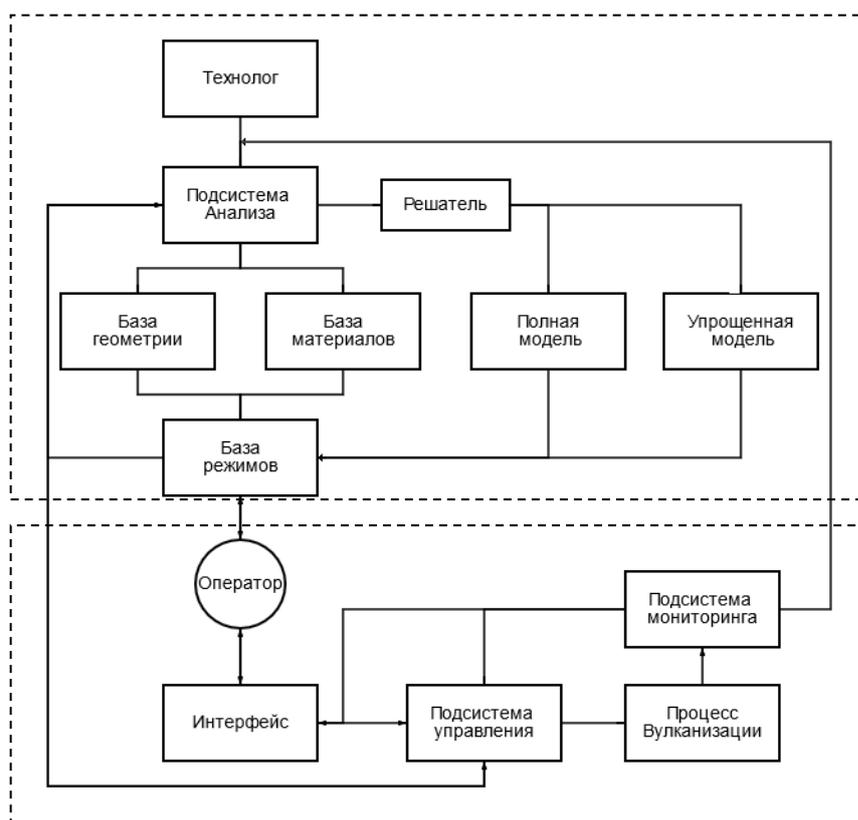


Рисунок 2.1 – Структурная модель СППР.

С СППР второго уровня взаимодействует оператор. Через интерфейс пульта управления поступает задание на изготовление заданного маркоразмера кабеля, отображаются величины заданных параметров и текущие значения, а также происходит взаимодействие с системой управления линией.

Оператор устанавливает на отдающее устройство барабан с указанной в техкарте заготовкой и загружает бункер экструдера заданной резиновой смесью. Происходит запуск линии, достигается установившийся режим изготовления.

В ходе производства система мониторинга отслеживает величины следующих параметров: скорость перемещения заготовки, температура и давление вулканизационной среды, диаметр жилы и диаметр изолированной жилы.

В системе управления происходит проверка отклонения полученных величин от заданных, в случае превышения допустимого отклонения происходит коррекция управляющих воздействий.

Для реализации компонента подсистемы анализа необходимо разработать подход управлению линией непрерывной вулканизации

## 2.2 АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Проблема выбора режима вулканизации обусловлена: во-первых широким разнообразием номенклатуры кабельных изделий, для каждого из которых задается свой режим. во-вторых, нештатными изменениями технологических параметров, например, при падении давления пара. в-третьих, разработкой новых конструкций кабеля и использованием альтернативных материалов.

Сформулирована следующая задача управления (1): получить заданные величины  $Y$  степени вулканизации и толщины изоляции с минимальными отклонениями, за счет подбора значений управляющих параметров процесса  $U_i$  в рамках накладываемых ограничений на значения входных параметров  $X_j$ , возмущающих воздействий  $Z_k$  и управляющих воздействий  $U_i$ .

$$\left( \begin{array}{l} Y = \{\varphi, \Delta_{из}\} \\ Y(t) = F_Y[U(t), X(t), Z(t)] \\ U_i \in (U_i^{\min}; U_i^{\max}), i = \overline{1, I} \\ X_j \in (X_j^{\min}; X_j^{\max}), j = \overline{1, J} \\ Z_k \in (Z_k^{\min}; Z_k^{\max}), k = \overline{1, K} \end{array} \right) \quad (1)$$

Вектор собственных параметров  $X = \{L, D_{тр}, D_{тпж}, D_{из}, \lambda, c, \rho, a, b, c, T_{тпж}, T_{из}, P\}$  сформирован из: диаметра ТПЖ ( $D_{тпж}$ ), диаметра по изоляции ( $D_{из}$ ), теплофизических свойств материалов ТПЖ и изоляции (теплопроводность ( $\lambda$ ), удельная теплоемкость ( $c$ ), плотность ( $\rho$ )), кинетические коэффициенты  $a, b, c$ ; длина вулканизационной трубы ( $L$ ) и ее диаметр ( $D_{тр}$ ); температура ТПЖ ( $T_{тпж}$ ) и изоляции ( $T_{из}$ ) на входе в вулканизационную трубу, давление пара в вулканизационной трубе ( $P$ ).

Вектор управляющих воздействий  $U = \{V, Q\}$  формируется из скорости движения изолированной жилы ( $V$ ) и расхода экструдера ( $Q$ ). Совокупность всех параметров и воздействий формирует вектор выходного состояния  $Y = \{\Delta_{из}, \varphi\}$ ,

состоящий из толщины изоляции ( $\Delta_{из}$ ) и степени завершенности процесса вулканизации ( $\phi$ ).

На систему воздействует вектор возмущающих воздействий  $Z = \{\Delta P, \Delta\phi, \Delta X\}$ , состоящий из величины отклонения давления  $\Delta P$ , заданной степени вулканизации  $\Delta\phi$ , входных параметров  $\Delta X$ .

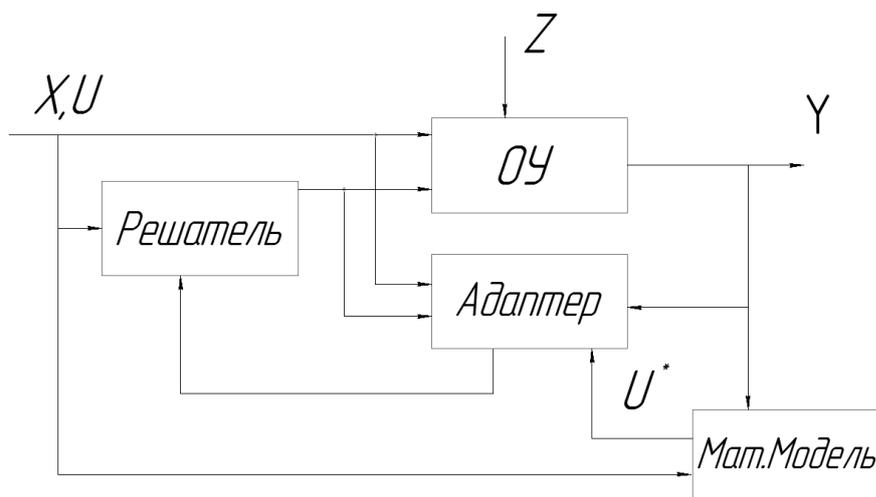


Рисунок 2.2 – Схема адаптивного управления.

Управление процессом вулканизации осуществляется изменением величины линейной скорости перемещения кабеля, величина которой определяет время пребывания кабеля в вулканизационной трубе, следовательно, степень сшивки на выходе из трубы. Регулирование скорости движения связано с изменением производительности экструдера ( $Q$ ), что обеспечивает получение изоляции заданной толщины. Таким образом, вектор управляющих воздействий может быть сформирован следующим образом  $U = \{V, Q\}$ .

На управляющие параметры накладываются следующие ограничения:

1. Скорость линии должна находиться в диапазоне от минимальной до максимально допустимой скорости для конкретной производственной линии. 1-30 м/мин.
2. Температура вулканизационной среды находится в диапазоне 140-210°C.
3. Должен обеспечиваться такой расход экструдера, при котором толщина изоляции находилась бы в заданном диапазоне  $\Delta_{из} \pm 10\%$ .

Для адаптивного управления линией вулканизации изоляции кабеля предлагается использовать следующую схему (рис 2.2).

В решатель передаются данные о параметрах объекта управления  $X$ , начальные величины управляющих воздействий  $U_0$ , возможные отклонения от параметров изолированной жилы  $Z$ . Происходит поиск управляющего воздействия  $U$  в базе данных, если текущий вариант не обнаружен, то происходит расчет управляющих воздействий при помощи математической модели.

В ходе производства возникают отклонения  $Z$  параметров изолированной жилы и давления в вулканизационной трубе вследствие чего меняются выходные параметры  $Y$ .

В ходе производства контролируются следующие величины: диаметр ТПЖ, входная температура ТПЖ, температура резиновой смеси и формующего инструмента, давление пара  $P$ , рассчитываются выходные параметры  $Y$ . Определяется разница величин выходных параметров  $Y$  и эталонных  $Y_{эт}$ .

Величина отклонения  $\Delta Y$  поступает в адаптер, где сравнивается с допустимой величиной отклонения. В случае превышения отклонения от нормы, происходит пересчет управляющих воздействий  $U^*$ .

Для расчета линейной скорости используется следующий алгоритм (рис. 2.3).

Производится ввод данных: параметры линии, конструкция кабеля, его теплофизические и вулканизационные свойства, задается минимальная величина степени вулканизации и начальная скорость равная максимальной. Происходит расчет распределения температуры в поперечном и продольном сечениях. Рассчитывается степень вулканизации внутреннего слоя изоляции кабеля. Если степень вулканизации отличается от заданной, происходит корректировка скорости и возврат к шагу 2. Расчет скорости производится до тех пор, пока степень вулканизации не достигнет заданной величины с определенным допуском.

На начальном этапе для выбора скорости предложен следующий алгоритм (рис. 2.4).

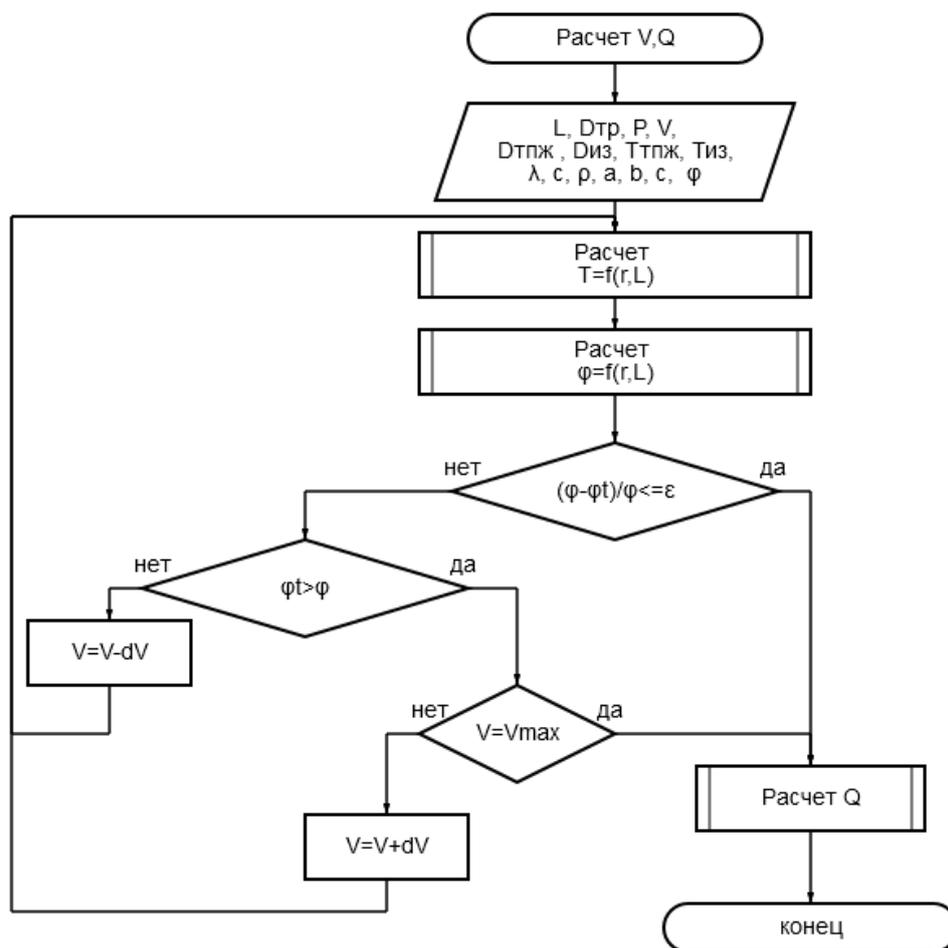


Рисунок 2.3 – Алгоритм расчета скорости линии.

Оператор вводит исходные данные: параметры объекта управления, конструкция кабеля, его теплофизические и вулканизационные свойства, задается минимальная величина степени вулканизации и начальная скорость.

Программа проверяет наличие величин управляющих воздействий для данного набора параметров. В случае их отсутствия происходит расчет скорости линии. Режим записывается в базу данных.

Периодически происходит опрос датчиков температуры жилы и изоляции, давления в вулканизационной трубе. В случае отклонения параметров от нормы происходит перерасчет скорости и расхода, полученный режим записывается в базу данных.

Разработанный алгоритм позволяет определить величину скорости для обширной номенклатуры маркоразмеров кабельно-проводниковой продукции, скорректировать режим при изменении параметров.

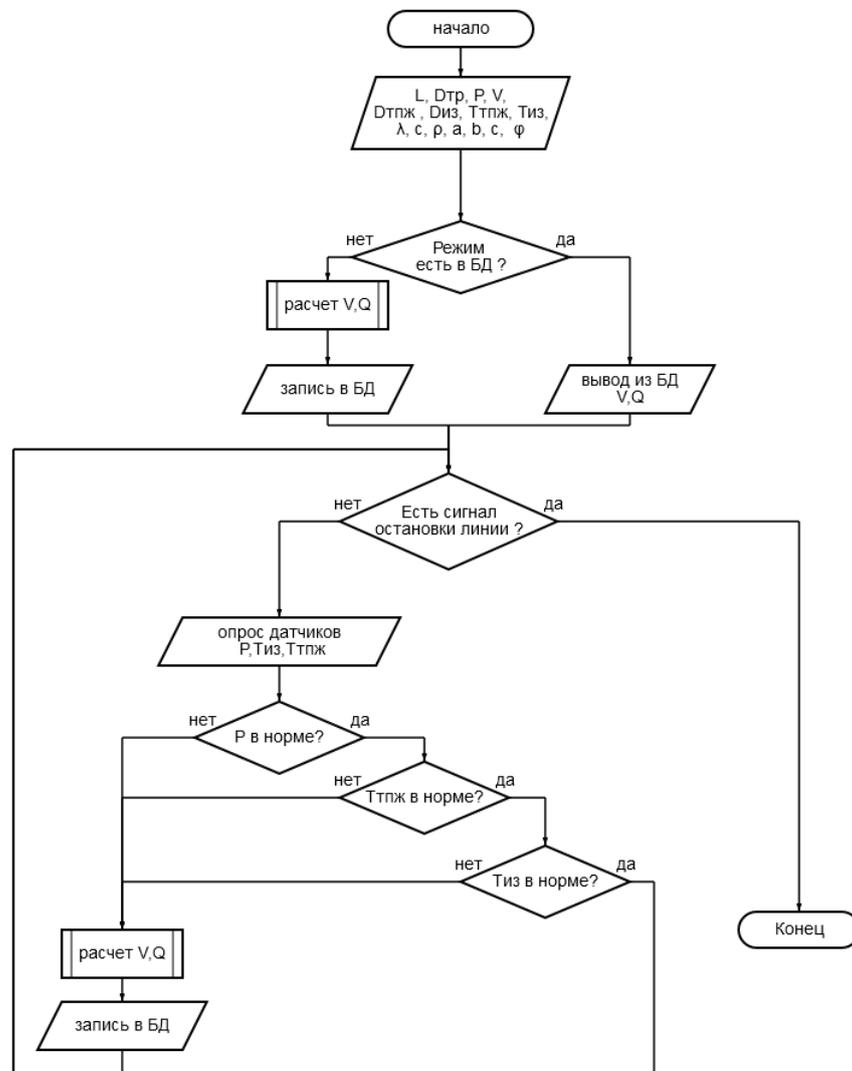


Рисунок 2.4 – Алгоритм коррекции скорости линии

Основные результаты опубликованы в статье Система поддержки принятия решений для управления производственной линией вулканизации изоляции силового кабеля / **И. Я. Дятлов** // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences.– 2023. – № 2. – С. 61–71.

## 2.3 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1. Поставлена задача управления процессом вулканизации.
2. Разработан алгоритм расчета скорости линии непрерывной вулканизации, который позволяет итерационно рассчитать скорость линии при помощи математической модели и подпрограммы расчета степени вулканизации.
3. Разработан алгоритм коррекции скорости линии непрерывной вулканизации, который позволяет скорректировать скорость линии в случае, если показатели с датчиков выходят за пределы допустимых значений.
4. Разработана двухуровневая система поддержки принятия решений в рамках работы технолога и оператора линии непрерывной вулканизации. Показано, что для технолога важно иметь возможность рассчитывать режимы работы линии при применении новых конструкций и материалов, а для оператора важно быстро реагировать на изменяющиеся внешние условия.

### ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ОПЕРАТОРА ЛИНИИ НЕПРЕРЫВНОЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ

Математическое описание процессов тепломассопереноса и кинетических процессов при вулканизации полимерной изоляции основывается на законах сохранения массы, энергии и количества движения. Решение совместной задачи осуществляется поэтапно. Задача рассмотрена в осесимметричной постановке. Проведено сравнение предложенных математических моделей. Оценена сходимость численного решения. Проведена оценка адекватности представленных математических моделей.

#### 3.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При производстве кабелей со сшитой изоляцией металлическая жила поступает в формующий инструмент экструдера, где накладывается полимерный слой и далее – в вулканизационной трубе происходит процесс нагрева и сшивки полимерной изоляции. Температура резиновой смеси на выходе из экструдера обычно составляет 70-90°C. Матрица экструдера герметично соединена с наклонной вулканизационной трубой (рис. 3.1). Внешняя поверхность трубы теплоизолирована.

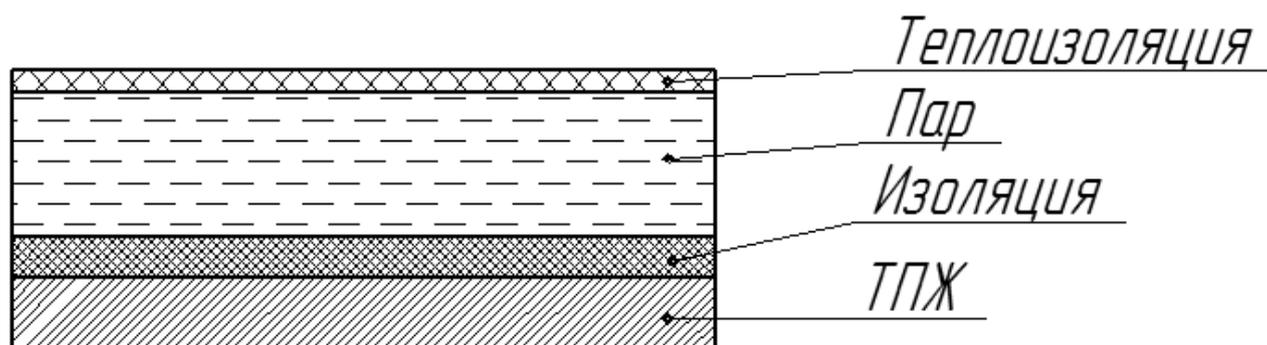


Рисунок 3.1 – Схематичное изображение области исследования

Вулканизационная труба при производстве кабелей с резиновой изоляцией заполнена паро-водной средой под давлением 0,15-0,17 МПа, при этом температура насыщенного пара составляет порядка 198-210°C . Зависимость температуры пара от давления представлена на рисунке.3.2.

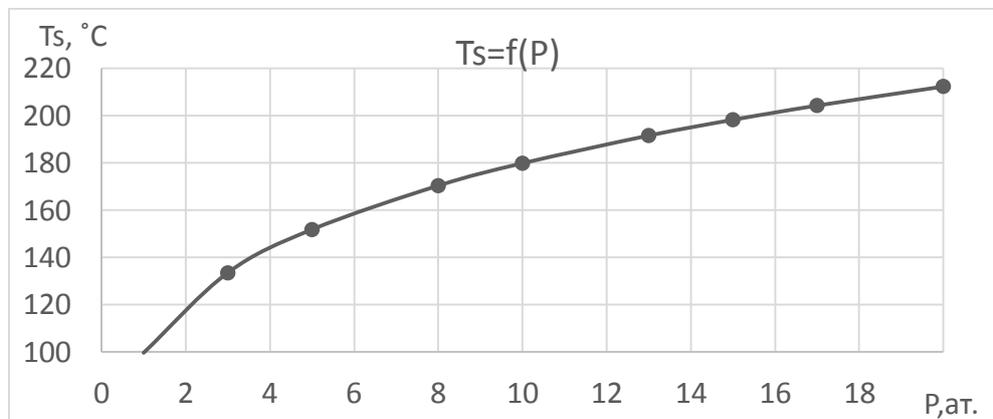


Рисунок 3.2 – Зависимость температуры пара от давления

В работе были сделаны следующие допущения: теплофизические свойства материалов кабеля постоянны, наклонная геометрия трубы, заменена горизонтальной, на подвижных и неподвижных границах выполняются условия прилипания и непроницаемости, на границах раздела разнородных сред задавались условия идеального теплового контакта, на поверхности вулканизационной трубы - условие адиабатического теплообмена, процесс вулканизации протекает без выделения тепла.

С учетом сделанных допущений система уравнений, основанная на законах сохранения энергии, массы и импульса с учетом кинетических преобразований принимает следующий вид (1).

$$\left\{ \begin{array}{l}
 c_{\theta} \rho_{\theta} \left( v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda_{\theta} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \\
 c_{\text{уз}} \rho_{\text{уз}} v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda_{\text{уз}} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \\
 c_{\text{тпж}} \rho_{\text{тпж}} v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda_{\text{тпж}} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \\
 \rho_{\theta} \left( v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rr})}{\partial r} + \frac{\partial\tau_{rz}}{\partial z} \\
 \rho_{\theta} \left( v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} + \frac{\partial\tau_{zz}}{\partial z} \\
 \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho_{\theta}v_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_{\theta}v_z)}{\partial z} = 0 \\
 \tau_{rz} = \mu \left( \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right); \quad \tau_{rr} = 2\mu \frac{\partial v_r}{\partial r}; \quad \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z}; \\
 \varphi = \frac{a(T)}{1 + \left( \frac{b(T)}{t} \right)^{c(T)}}; \quad t = \frac{z}{V_z};
 \end{array} \right. \quad (2)$$

Плотность пароводной среды определяется законом Буссинеска:

$$\rho_4(T) = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)]$$

где,  $\rho, c, \lambda$  – плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ),  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{C})$ ,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{C})$ );  $r, z$  – координата цилиндрической системы;  $v_z, v_r$  – компоненты вектора скорости ( $\text{м}/\text{с}$ );  $T$  – температура ( $\text{C}$ );  $\tau_{rr}, \tau_{rz}, \tau_{zz}$  – тензор напряжений,  $\mu$  – вязкость среды;  $g$  – ускорение свободного падения ( $\text{м}/\text{с}^2$ );  $\beta$  – коэффициент термического расширения ( $\text{K}^{-1}$ );  $\varphi$  – степень завершенности процесса вулканизации;  $a(T), b(T), c(T)$  – коэффициенты вулканизационных свойств (выражения для описания вулканизации);  $t$  – время ( $\text{с}$ ).

Система уравнений замыкалась следующими граничными условиями (рис.3.3):

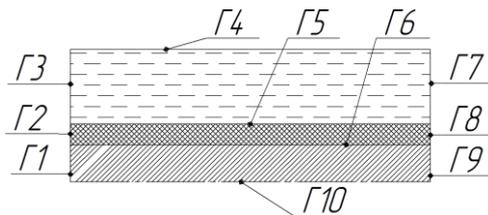


Рисунок 3.3 – Граничные условия

На входе задается температура ТПЖ и температура сшиваемой изоляции (Г1, Г2). Температура ТПЖ и изоляции составляет 80°C. ТПЖ и изоляция перемещаются внутри трубы со скоростью  $V_0$ . на выходе задана производная температуры по оси  $z$  равная нулю (Г8, Г9). По осевой линии (Г10), проходящей через центр ТПЖ, задается условие симметрии. На границах контакта ТПЖ-изоляция (Г6) задается условие идеального теплового контакта

На поверхности изоляции (Г5) реализовано условие непрониновения и прилипания. На входе и выходе трубы задаются давления пара (Г3, Г7), величины которых равны 11 и 10,9 атмосфер, при этом температура пара на входе составляет 180°C. На поверхности вулканизационной трубы (Г4) задано условие адиабатического теплообмена, а также условие непрониновения и прилипания.

### 3.2. МЕТОД РЕШЕНИЯ. СХОДИМОСТЬ РЕШЕНИЯ.

Для решения поставленной задачи использовался метод конечных объемов (МКО). Математическая модель непрерывного процесса вулканизации изоляции кабеля реализована в программном комплексе ANSYS Fluent.

Для разбиения геометрической модели на сетку конечных объемов (рис 3.4) использовалась среда ANSYS ICEM CFD.

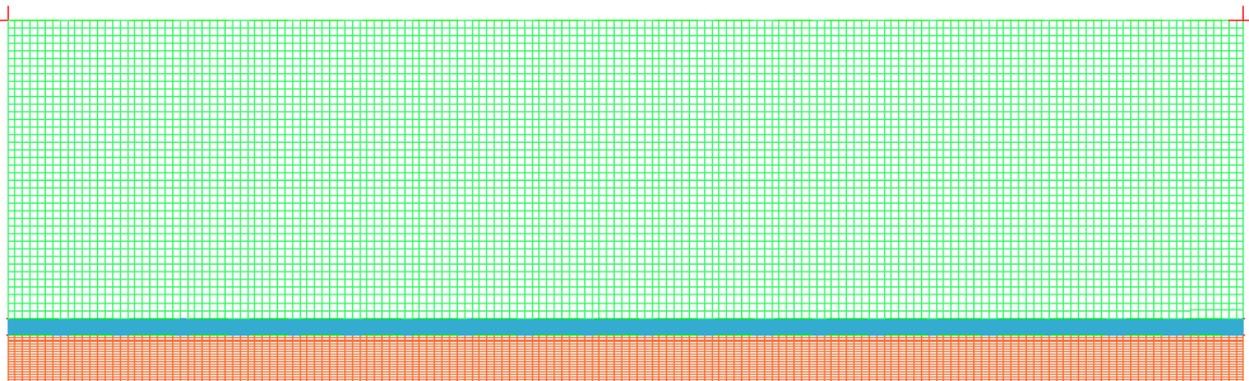


Рисунок 3.4 – Сеточная модель исследуемой области

Применение двухмерных блоков позволило получить прямоугольные элементы с заданным количеством на каждом элементе. Исследование сходимости проводилось следующим образом. Для внутреннего слоя изоляции

строились зависимости минимальной температуры изоляции от количества элементов и счетных итераций. Исследование процесса сходимости численного решения позволило определить необходимое число конечных объемов и числа итераций. Достаточное количество элементов 13280 элементов.

Было принято, что когда величина температуры переставала отличаться на более чем 1-3%, то решение сошлось. Графические зависимости значения температуры внутреннего слоя изоляции от числа элементов по оси z представлены на рисунке 3.5, от числа счетных итераций на рис. 3.6.

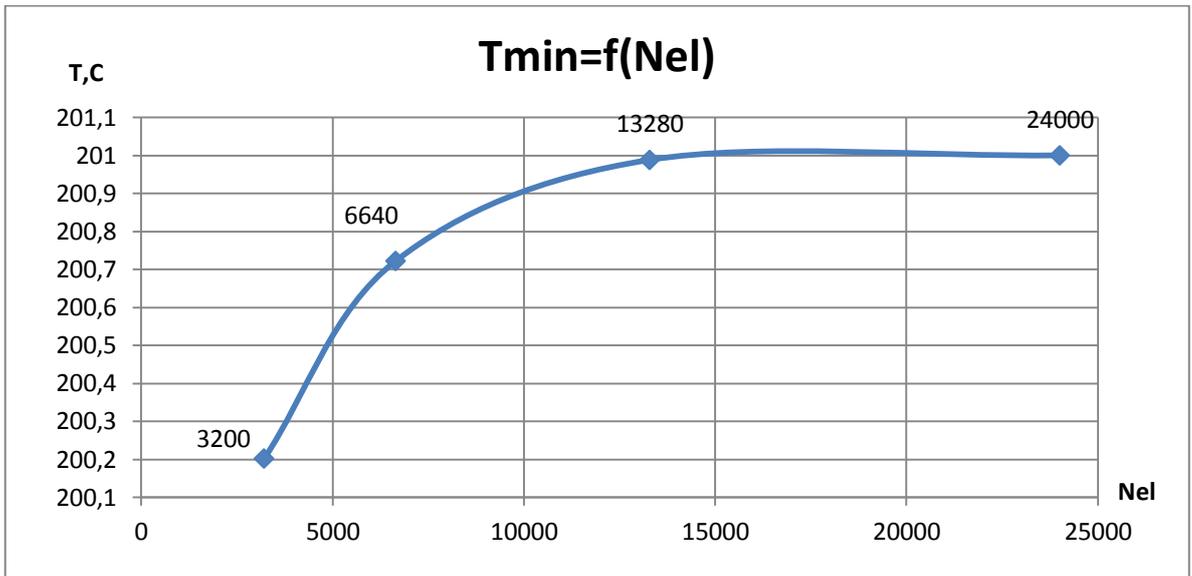


Рисунок 3.5 – Зависимость минимальной температуры изоляции от числа элементов

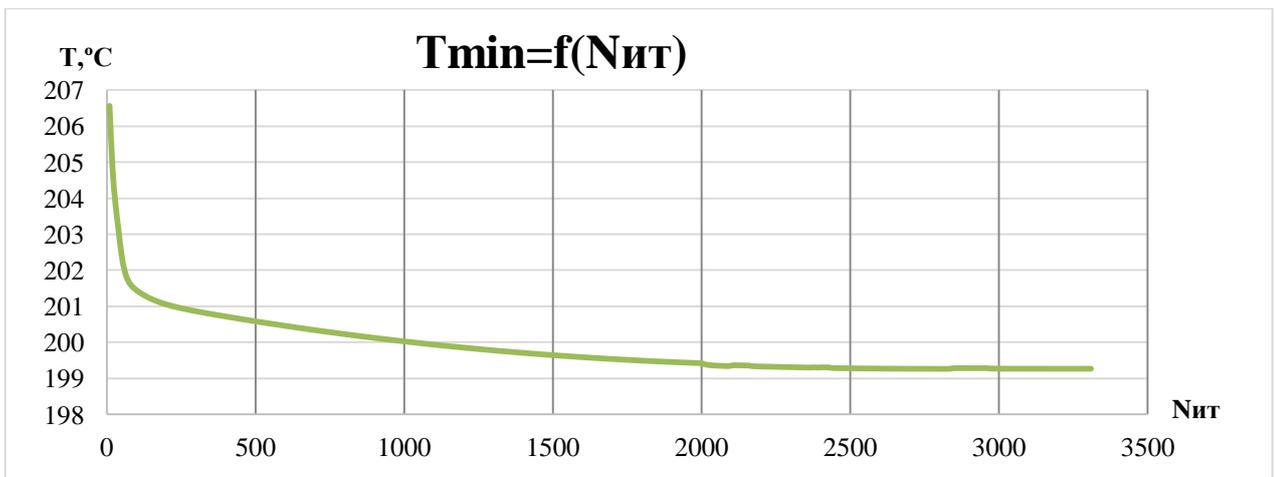


Рисунок 3.6 – Зависимость минимальной температуры изоляции от числа счетных итераций

Исследование на сходимость показало, что для получения установившегося решения необходимо порядка 3000 счетных итераций и 14 000 элементов.

### 3.3. СРАВНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ. АНАЛИЗ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛЕЙ.

Вулканизирующая среда может представлять собой перенасыщенный пар, перегретую воду поэтому важно оценить, какая из вариаций вулканизационных сред в математической модели даст более коррелирующий результат в сравнении с экспериментом.

Результаты расчетов при использовании разных вулканизационных сред (рис. 3.7, 3.8) упрощенной модели с жестко заданной величиной коэффициента теплообмена (рис. 3.9).

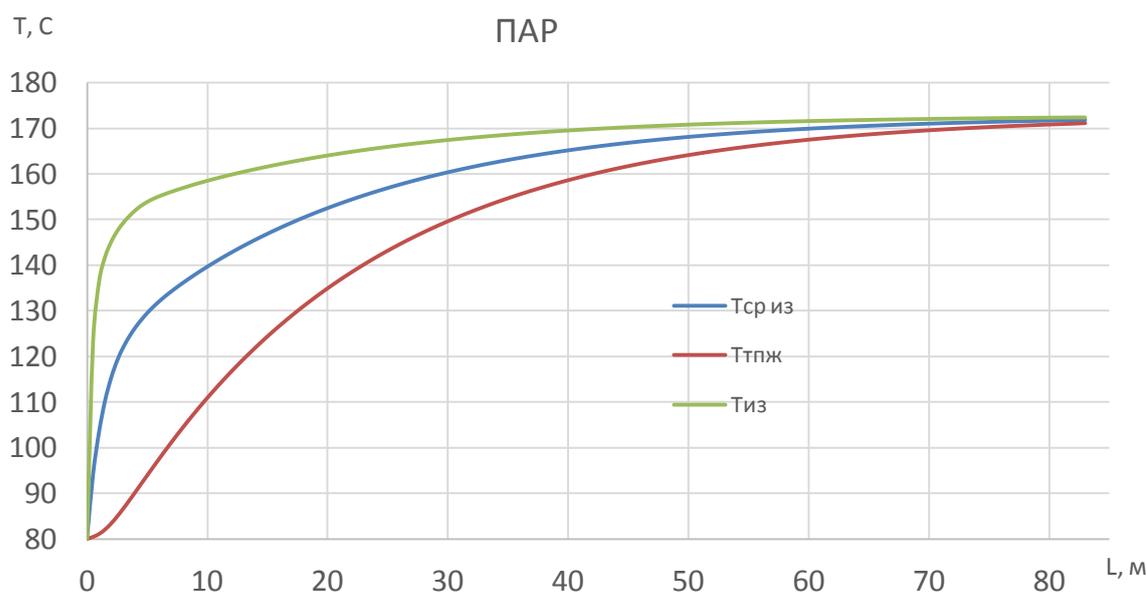


Рисунок 3.7 – Распределение температуры на ТПЖ, в центре изоляции и на поверхности изоляции, при использовании пара в качестве вулканизационной среды

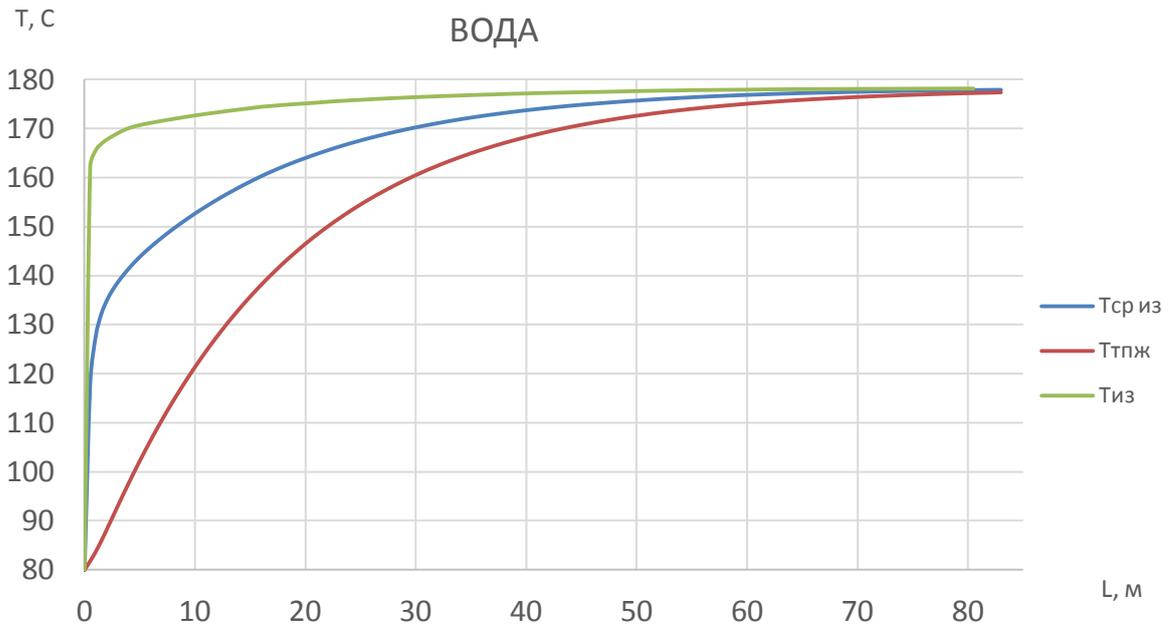


Рисунок 3.8 – Распределение температуры на ТПЖ, в центре изоляции и на поверхности изоляции, при использовании воды в качестве вулканизационной среды

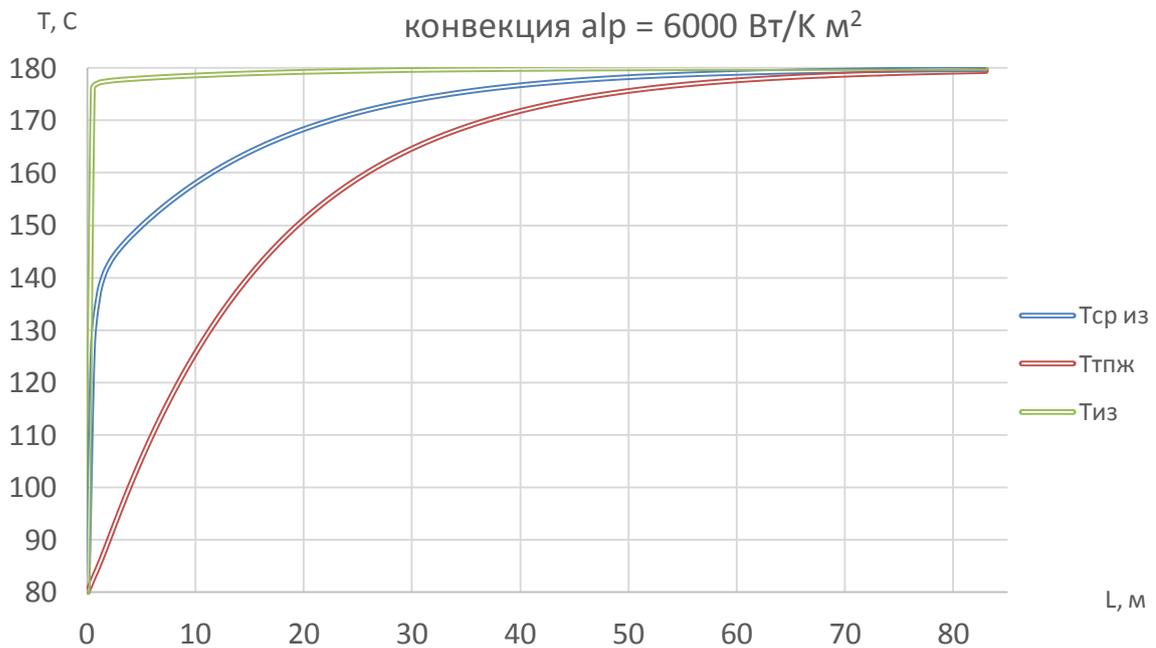


Рисунок 3.9 – Распределение температуры на ТПЖ, в центре изоляции и на поверхности изоляции

В данном случае, движение среды заменено на эффективный коэффициент конвективного теплообмена, при котором коэффициент теплоотдачи был равен  $\alpha p = 6000 \text{ Вт/К м}^2$ .

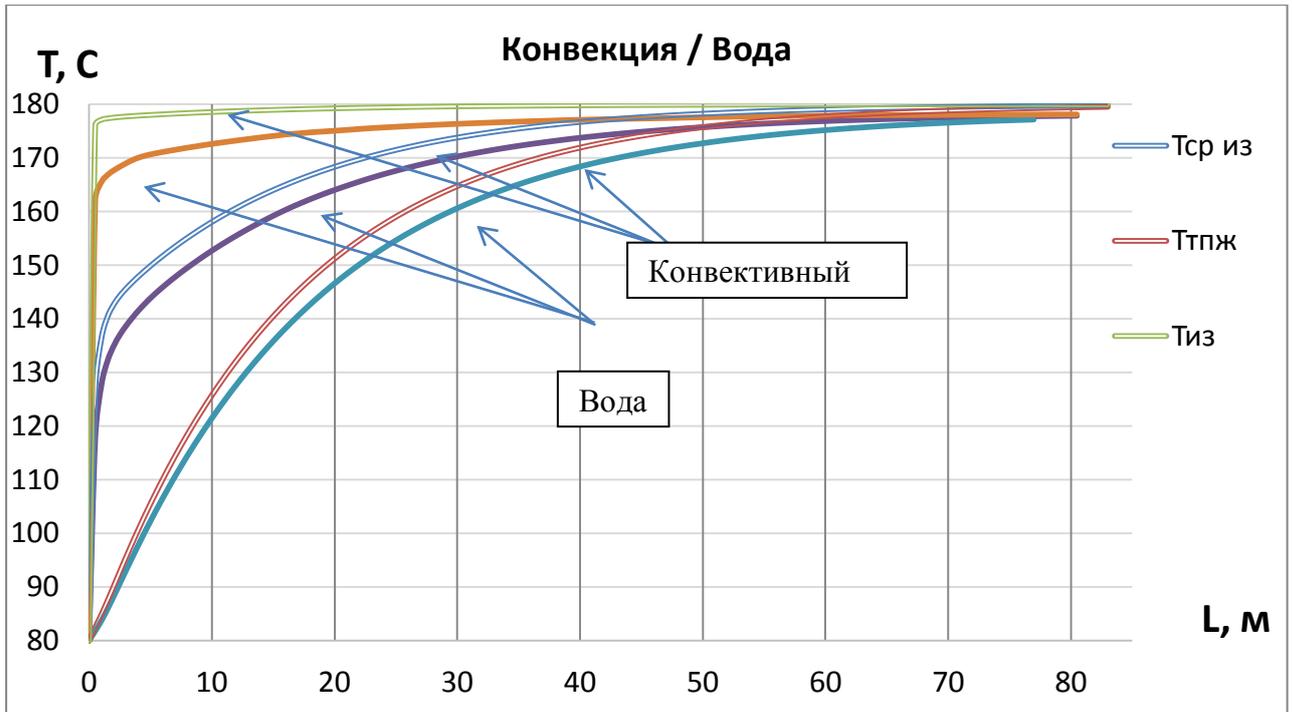


Рисунок 3.10 – Распределение температуры на ТПЖ, в центре изоляции и на поверхности изоляции

Из рисунка 3.10 видно, что отличие между моделью с подвижной средой и моделью с жестко заданным коэффициентом теплоотдачи составляет порядка 5-8 °C.

Для проверки адекватности модели проведен эксперимент по измерению величины максимальной температуры на поверхности ТПЖ непосредственно в ходе производственного процесса. Температура определена при помощи термоиндикаторной наклейки testoterm 0646 2532 (рис 3.11-а).

Наклейка имеет градуированную шкалу от 161 до 204 °C. При достижении определенной температуры, реагент внутри шкалы необратимо меняет свой цвет (рис 3.11-б).

В ходе производства при смене заготовки ТПЖ в метре от стыка приклеивалась наклейка к поверхности ТПЖ. После прохождения всей производственной линии из заготовки вырезался участок с наклейкой.

Изолированная заготовка разбиралась, фиксировались показания с наклейки.

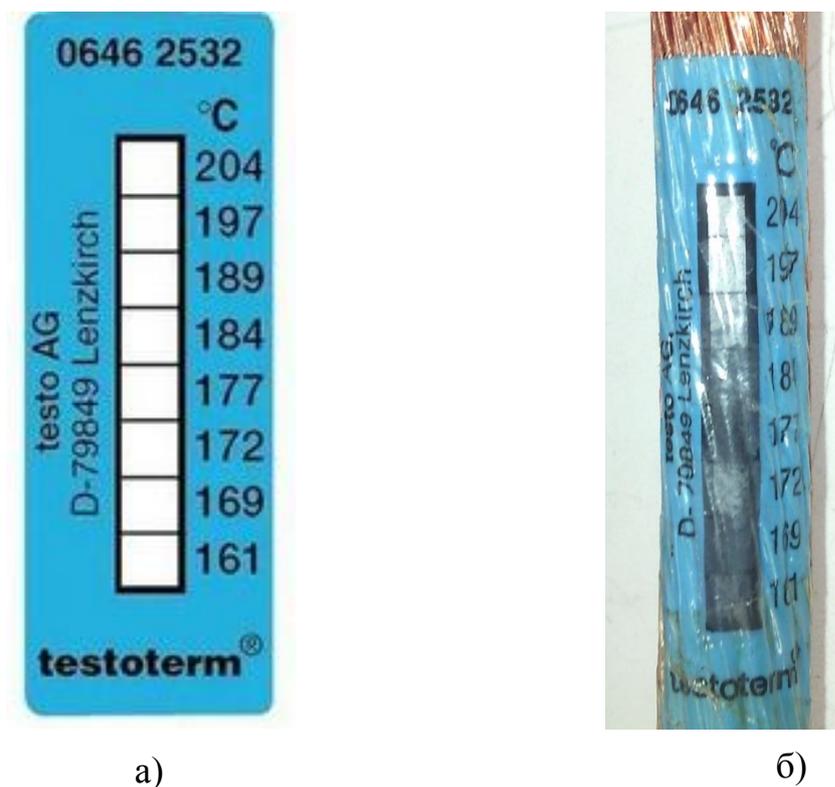


Рисунок 3.11 – Термоиндикаторная наклейка: а) до испытания, б) после испытания

В ходе испытаний было получено значение максимальной температуры на ТПЖ в диапазоне 181-189°C. Что хорошо согласуется с величиной максимальной температуры, рассчитанной ранее. Рис.3.7

Технологические параметры изолирования:

1. скорость изолирования - 30 м/мин
2. Давление пара = 17 атм
3. Температура в вулканизационной трубе =  $185 \pm 4^\circ \text{C}$ .
4. Диаметр ТПЖ= 12,5мм
5. Толщина изоляции =1,7 мм

### 3.4. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1. Реализована пространственная математическая модель процессов теплопереноса внутри вулканизационной трубы. Позволяет рассчитать распределение температурного поля.

2. Построена сетка конечных объемов и определено их необходимое количество. Для получения устойчивого решения необходимо использовать более 14 000 конечных объемов.

3. Проведена оценка сходимости итерационного процесса. Устойчивого решения необходимо использовать более 14 000 конечных объемов.

4. Проведено сравнение различных условий теплообмена. Что позволило выбрать оптимальную модель

5. Проведена проверка на адекватность модели, путем сравнения с результатами эксперимента. Полученные результаты можно считать адекватными.

## **ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВУЛКАНИЗАЦИОННЫХ СВОЙСТВ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ**

Как было отмечено в первой главе, для реализации СППР необходима база данных, включающая типы материалов из резиновых смесей и их характеристики. Сама по себе это сложная задача, требующая получения и обработки большого числа экспериментальных данных. Кроме этого, при моделировании процесса сшивки резиновой изоляции необходимо определение и задание вулканизационных свойств резиновых смесей. Вулканизационные характеристики различных марок резиновых смесей могут существенно отличаться, что обусловлено разными основами синтетических каучуков, количеством и типом вулканизирующего агента, пластификаторами и другими компонентами смеси. Поскольку на скорость процесса вулканизации существенно влияет температура, то важным является определение вулканизационных характеристик в зависимости от температуры и времени выдержки исследуемого материала.

В главе приведены результаты натуральных экспериментов по определению зависимости степени завершенности процесса вулканизации от времени при различных значениях температуры.

### **4.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВУЛКАНИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

В работе рассмотрены 3 вида резиновых смесей используемых в качестве изоляционных материалов.

Анализ вулканизационных свойств исследуемых резиновых смесей проводился на гибридном реометре ротационного типа Discovery HR-2 производства «TA Instruments» (см. рис. 4.1.).



Рисунок 4.1 – Внешний вид реометра DHR-2 TA Instruments

В процессе экспериментального определения реологических свойств исследуемый образец подвергается осциллирующим деформациям. Данный вид испытаний называется «динамическим» и заключается в том, что ротор реометра попеременно отклоняется по синусоидальной временной функции на малый угол  $\varphi$  вправо и влево (рис. 4.2).

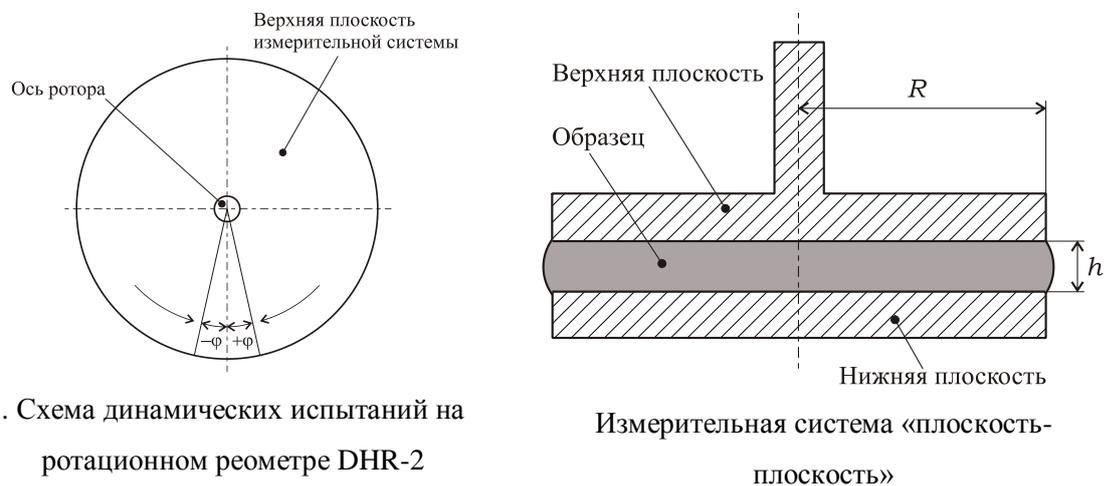


Рисунок 4.2 – Измерительная система реометра

В экспериментах использовалась измерительная система «плоскость-плоскость» с радиусом окружности  $R=12,5$  мм и зазором между пластинами  $h=1$  мм

Образец, помещался между рабочими поверхностями, которые нагревались до температуры 90-110°C. Образец сжимался с осевым усилием 50Н, до тех пор, пока толщина образца в зазоре не составит порядка 1 мм.

После достижения заданного зазора начинался нагрев рабочих поверхностей до заданной температуры (в диапазоне 160-190 °С). К образцу прикладывалась угловая осцилляционная нагрузка с частотой 10 рад/с, поддерживалось осевое усилие 5 Н.

В ходе исследования фиксировалось изменение величины крутящего момента во времени.

Эксперимент заканчивался при достижении величины крутящего момента при заданной температуре стационарного, установившегося значения.

В результате серии испытаний было получено семейство кривых зависимости крутящего момента от времени для различных значений температуры. Для резины марки 3 зависимость крутящего момента от времени и температуры представлена на рисунке 4.3.

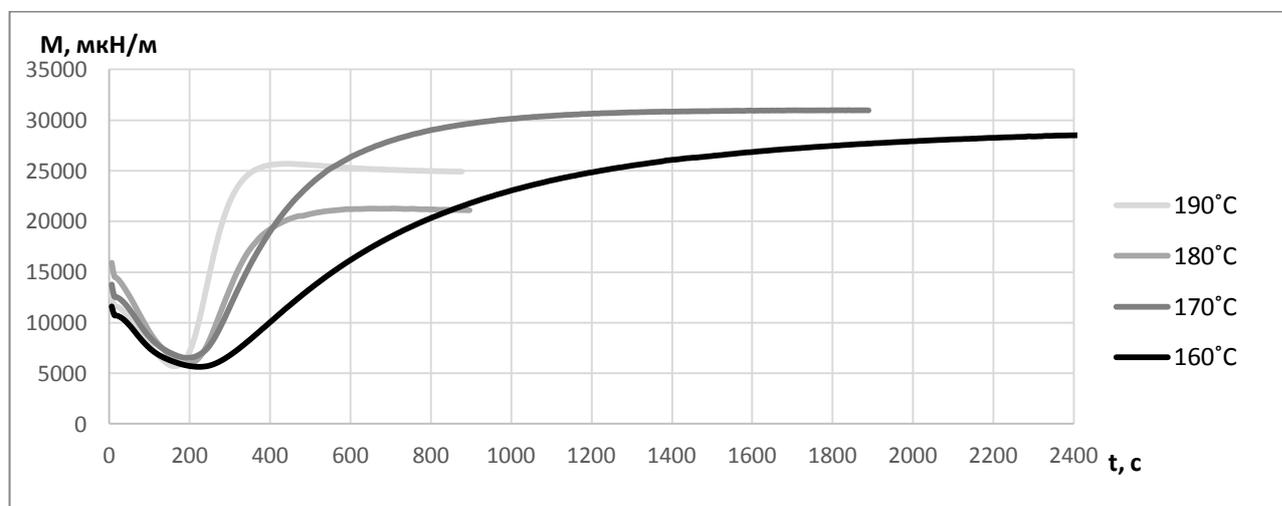


Рисунок 4.3 – Изменение крутящего момента во времени при разной температуре выдержки

Видно, что температура образца, варьируемая от 160°C до 190°C, существенно влияет на максимальную величину крутящего момента и на время его достижения, рис.4.3. Наименьшее время выхода процесса на стационар

соответствует наибольшему значению температуры - 190°C, а наибольшее значение крутящего момента соответствует температуре 170 °С.

Начальный участок кривых, где происходит снижение величины крутящего момента, обусловлен молекулярной перестройкой в материале. Чем выше температура выдержки, тем меньше времени длится процесс перестройки (предсшивки).

Современный подход в экспериментальном исследовании процесса сшивки основывается на оценке текущего, максимального и минимального значений крутящего момента.

Используя значения текущего крутящего момента, полученные в процессе эксперимента, можно определить зависимость степени завершенности сшивки от времени (1):

$$\varphi_{\text{э}} = \frac{M - M_{\text{min}}}{M_{\text{max}} - M_{\text{min}}} \quad (1)$$

где  $M$ –текущий крутящий момент,  $M_{\text{min}}$  – минимальный крутящий момент,  $M_{\text{max}}$ – максимальный крутящий момент.

Была проведена серия экспериментов для трех различных марок резины, для которых по средствам выражения (1) было получено семейство кривых зависимости степени сшивки от времени. На рисунке 4.4 представлены вулканизационные кривые для трех материалов при различных температурах.

Из рисунка видно, что чем выше температура образца, тем быстрее протекает процесс вулканизации. Можно отметить, что для образцов, выдержанных при температуре 160°C процесс вулканизации за 40 минут (2400 с) не завершен, а для образцов с температурой 190°C процесс завершился за 3-5 минут.

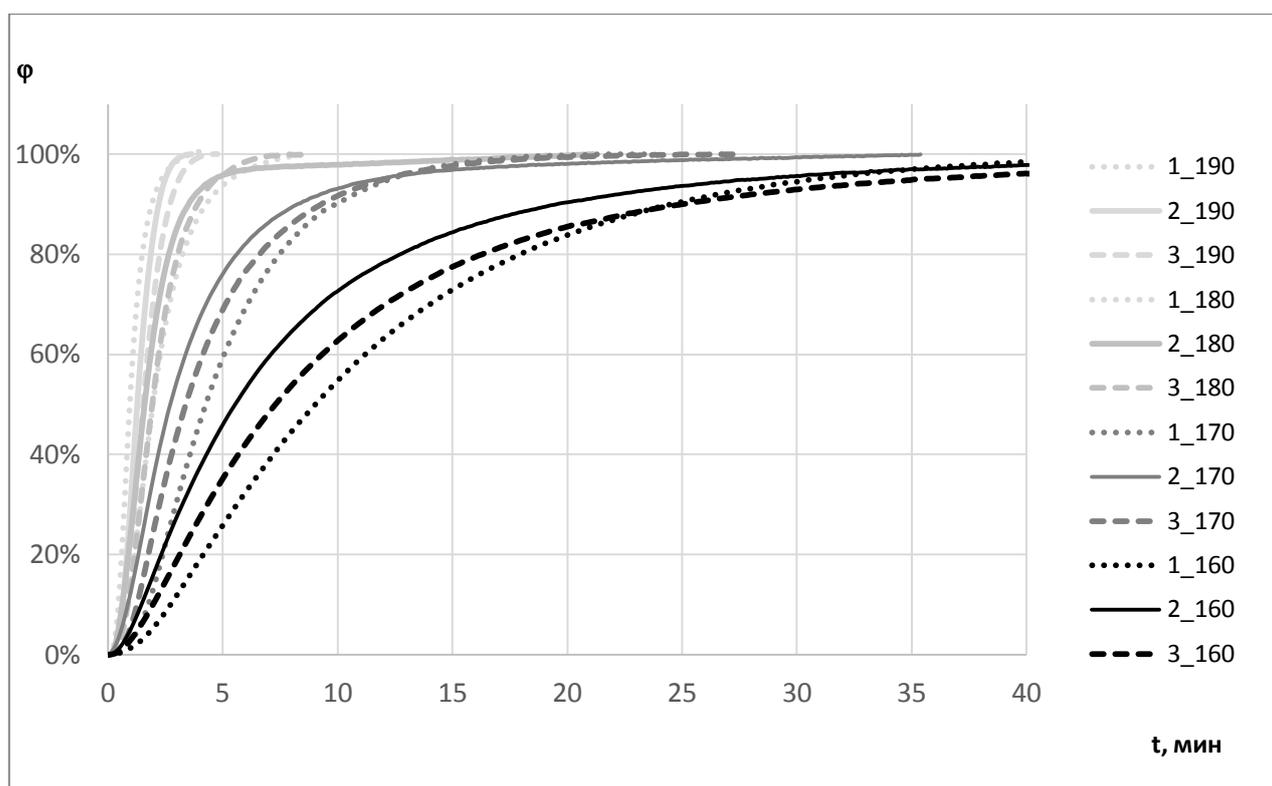


Рисунок 4.4 – Семейство кривых вулканизации для трех разных марок резины при различных температурах выдержки

Можно отметить, что образец марки резины 2 (сплошная линия) вулканизируется быстрее марок 1 и 3, что особенно заметно для температур 160-170°C. Так величина степени вулканизации после 10 минут выдержки при температуре 160°C составила для марок 2-73%, 3- 63% , 1-53% (отличие для резины 2 и 1 составляет более 30%), после 5 минут при 170°C 2-74%, 3-68%, 1-60% (отличие более 20%).

Из анализа полученных результатов следует, что время завершения процесса вулканизации различно и зависит от величины начальной температуры и марки резины.

Кривые зависимости времени завершения процесса для трех материалов в зависимости от начальной температуры представлены на рис.4.5.

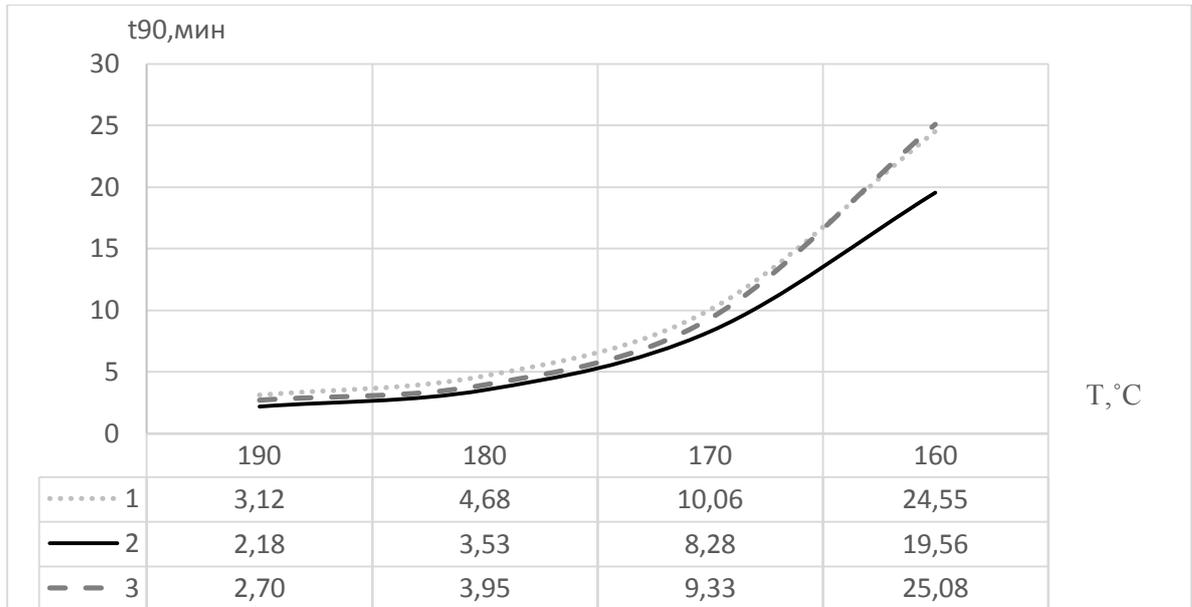


Рисунок 4.5 – Зависимость времени завершения вулканизации на 90% образцов от температуры

Из рисунка 3 видно, что заметное отличие возникает при температурах ниже 170 °C. Максимальное отличие при температуре 160 °C составляет более 20 % для образца 2, который сшивается быстрее образцов 1 и 3. Отсюда можно сделать вывод, что при использовании материала 2 можно увеличить скорость производства до 20%, что

При производстве кабелей с резиновой изоляцией процесс вулканизации происходит в вулканизационной трубе, где по мере продвижения кабеля температура изолированной жилы непрерывно изменяется. Таким образом, процесс вулканизации протекает в материале с разными скоростями как в радиальном направлении, так и в продольном. Поэтому степень вулканизации внутренних слоев может отличаться от внешних.

Результаты опубликованы в статье «Исследование процесса вулканизации резиновой смеси при помощи ротационного реометра / И. Я. Дятлов, Н. М. Труфанова // Научно-технический вестник Поволжья. - 2018. - № 7. - С. 91-94.»

## 4.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СТЕПЕНИ ВУЛКАНИЗАЦИИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВРЕМЕНИ.

В современной научной литературе рассматриваются различные подходы для описания зависимости степени вулканизации полимерных материалов от температуры и времени процесса.

Регрессионные выражения, полученные на основе реометрических испытаний различны и имеют следующий вид:

$$\varphi = \frac{a}{1 + \exp\left(-\frac{t-b}{c}\right)} \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{a}{\left(1 + \exp\left(-\frac{t - c * \ln(2^{\frac{1}{d}} - b)}{c}\right)\right)^d} \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{a}{1 + \left(\frac{t}{b}\right)^c} \quad (3)$$

$$\varphi = a * \exp\left(-\exp\left(-\frac{t - c * \ln(\ln(2)) - b}{c}\right)\right) \quad (4)$$

где,

$\varphi$  - степень вулканизации,  $t$  - время вулканизации,  $a, b, c, d$  – коэффициенты, полученные с помощью регрессионного анализа экспериментальных кривых.

Для оценки применимости выражений (1)-(4), рассмотрим экспериментальную кривую степени сшивки для температуры 180°C и сравним со значениями, полученными по выражениям (1)-(4) (рисунок 3).

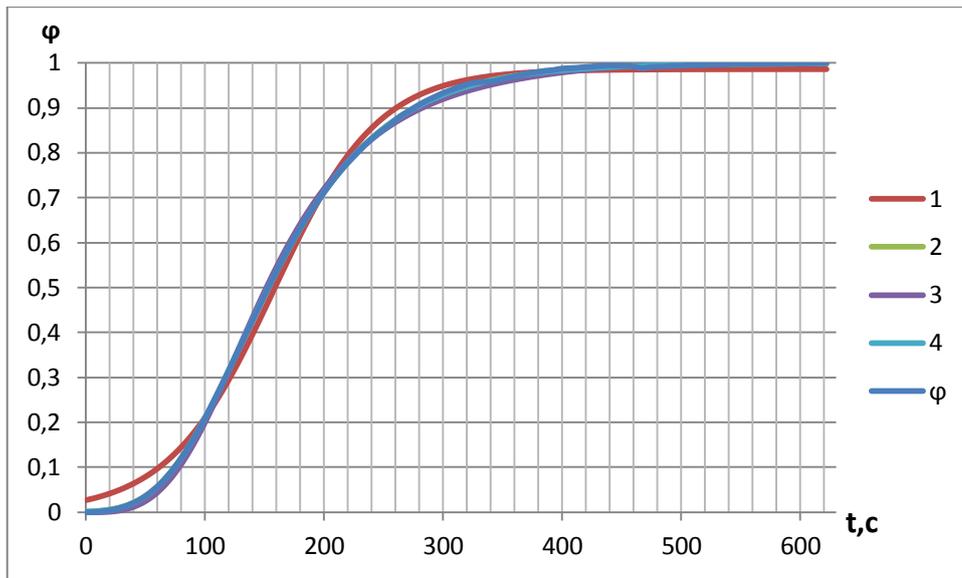


Рисунок 4.6 – Сравнение экспериментальных и расчётных кривых

Из рис.4.6 видно, что зависимости (2)-(4) достаточно хорошо описывают экспериментальную кривую на всем временном промежутке.

Для анализа подобных кривых, полученных для других значений температур, используем дисперсионный анализ, в частности коэффициент детерминации ( $R^2$ )

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}$$

$$SS_{res} = \sum_i (\varphi_i - f_i)^2$$

$$SS_{tot} = \sum_i (\varphi_i - \bar{\varphi})^2$$

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i$$

где,

- $SS_{res}$ - сумма квадратов остатков регрессии

- $SS_{tot}$  -сумма квадратов общая

- $\varphi_i$  -степень вулканизации в данной точке

- $\bar{\varphi}$  -средняя степень вулканизации

- $f_i$  -расчетное значение степени вулканизации

-Визуализация расчётных данных приведена на рисунке 4.7.

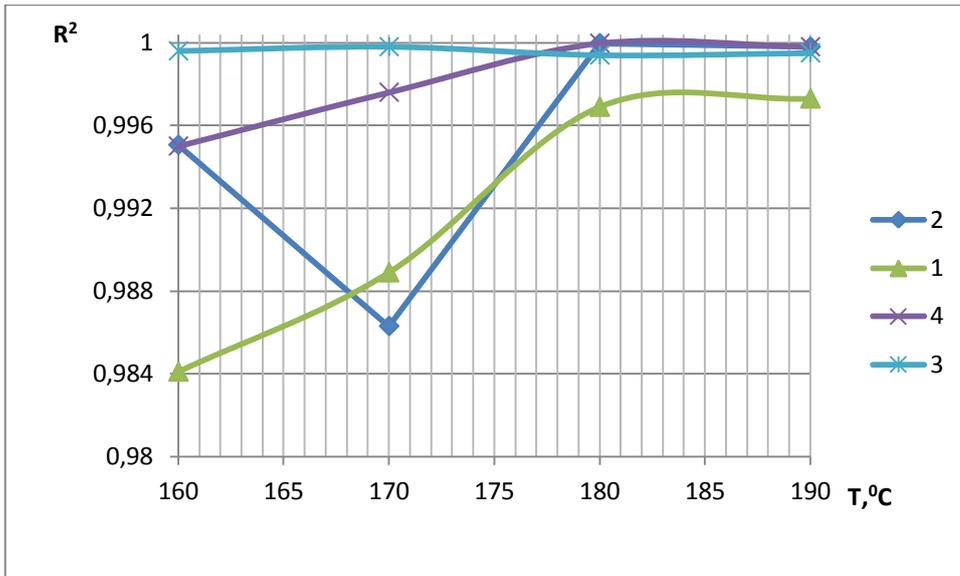


Рисунок 4.7 – Зависимость  $R^2$  от температуры

Из рисунка видно, что точность описания экспериментальных кривых для всего спектра температур достаточно высока. Выражение (3) имеет минимальное отклонение от 1 параметра  $R^2$ , что прослеживается для всего диапазона температур.

На рисунке 4.8 представлена зависимость абсолютной погрешности степени вулканизации во времени для различных аналитических выражений (1)-(4).

Абсолютная погрешность показывает отклонение рассчитанной величины, от величины полученной экспериментально в данный момент времени. Видно, что наименьшие отклонения возникают в случае использования выражений (2) и (4).

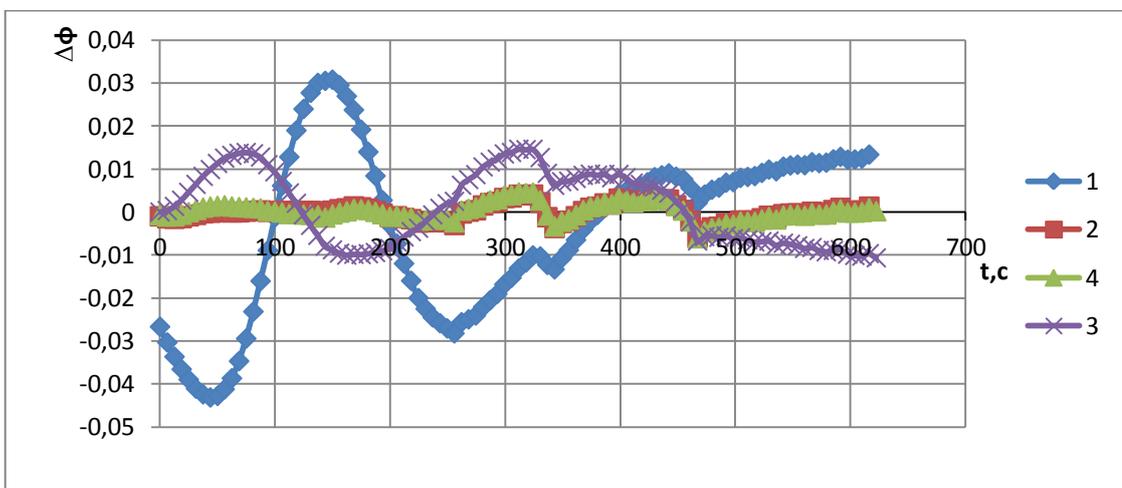


Рисунок 4.8 – Распределение абсолютной погрешности

Исходя из результатов анализа выражений, было выбрано выражение (3), Зависимость процесса вулканизации от времени для каждой температуры была представлена в следующем виде:

$$\varphi_p = \frac{a}{1 + (t/b)^c} \quad (3)$$

где,  $a$ -Максимальная амплитуда,  $b$ -время 50% завершенности процесса вулканизации  $\varphi_p(b)=0,5$ ,  $c$ -коэффициент скорости изменения функции.

$t$ -время, с.

Поскольку величина степени сшивки зависит от температуры выдержки, то для различных значений температур необходимо определять свои значения коэффициентов  $a, b, c$ . В этом случае уравнение (3) преобразуется так:

$$\varphi = \frac{a(T)}{1 + \left(\frac{t}{b(T)}\right)^{c(T)}} \quad (4)$$

Для определения значений параметров выражения (2) –  $a, b, c$  используем метод минимизации разности квадратов для описания экспериментальных кривых, полученных при температурах (160-190)°С.

Определим сумму квадратов разностей экспериментальных и расчетных значений степени вулканизации  $Q$

$$Q = \sum_{i=1}^N (\varphi_{Э_i} - \varphi_{P_i})^2 \quad (5)$$

где  $\varphi_{Э}$ -значение степени сшивки, полученной в результате эксперимента,  $\varphi_p$  - расчетное значение, полученное по выражению (4).

Наименьшее отклонение расчетных от экспериментальных величин степени вулканизации будет обеспечено при  $Q \rightarrow 0$ .

Для минимизации  $Q$  итерационным методом определяются значения  $a, b, c$  в указанных пределах  $a=(1 \div 1,06)$ ,  $b=(b \pm b * 0.2)$ ,  $c=(-5 \div -1)$ , определенных опытным путем.

Коэффициенты  $a, b, c$  для каждой температуры рассчитывается следующим образом.

Задается начальное значение коэффициентов

$$a=1, b=t_{50\%} \text{ т.е. } \varphi_p(t_{50\%})=0,5, c = -3$$

Подбор коэффициентов осуществляется итерационным методом.

1) Определяется зависимость величины  $Q$  от значения коэффициента  $c$ . Величина коэффициента  $c$  подбирается таким образом, чтобы зависимость  $Q(c)$  носила U-образный характер. Выбирается значение  $c$ , при котором величина  $Q$  минимальна.

2) Затем происходит аналогичные вычисления для коэффициентов  $a$  и  $b$ . Оценивается величина  $Q$  на каждом шаге итерационного процесса и определяется ее минимальное значение.

3) Итерационный расчет заканчивается, когда величина  $Q$  отличается не более чем на 0,001% от предыдущей итерации.

Таким образом, были рассчитаны коэффициенты выражения (2) для заданных значений температур и исследуемых марок резин.

Рассчитанные значения коэффициентов выражения (2) для всех экспериментальных кривых приведены в таблице 4.1, графические зависимости коэффициентов от температуры и марки резины представлены на рис 4.9

Таблица 4.1 – Зависимость коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , от температуры для разных марок резины

Т, °С	a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_3	a_3	b_3	c_3
160	1,0544	569,3178	-1,8167	1,0221	339,0293	-1,5974	1,0150	443,7959	-1,6733
170	1,0263	261,2614	-2,3748	1,0047	162,8336	-1,9118	1,0198	208,6409	-2,0643
180	1,0220	119,2776	-2,6144	1,0000	89,9000	-2,5900	1,0224	116,1922	-2,8228
190	1,0370	108,2000	-3,4900	1,0310	73,4000	-3,4900	1,0466	93,5486	-3,1612

Анализ полученных результатов показал существенную зависимость параметров  $a, b, c$  уравнения (1) от температуры. Наибольшее влияние температура оказывает на параметр  $b$ , рис.4.9

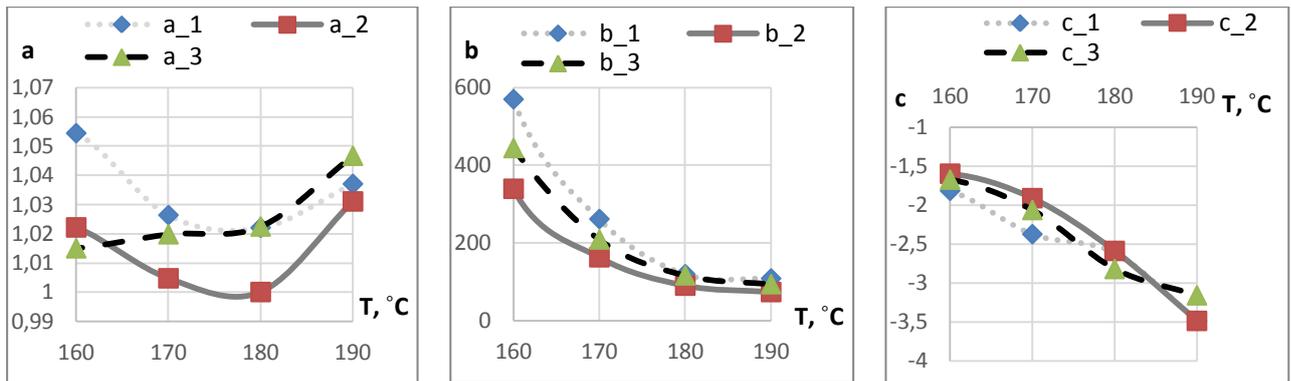


Рисунок 4.9 – Зависимость коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , от температуры для разных марок резины

В рассматриваемом диапазоне температур величина параметра  $b$  изменяется в несколько раз, в то время, как отличие величины параметра  $a$  для всех марок и всех температур менее 3%. Видно, что для температур 160°C величина  $b$  марки 1 отличается на 67% от марки 2. При температуре 190°C отличия составляют 48%.

Для материала марки 2 величина коэффициента  $b$  является наименьшей на всем температурном интервале. Что также свидетельствует о лучших вулканизационных характеристиках. Так как коэффициент  $b$  – это время, за которое завершенность сшивки составит 50%.

На основе рассчитанных коэффициентов были получены вулканизационные кривые для образцов с различной температурой. На рисунке 4.10 приведены экспериментальные и расчетные зависимости степени сшивки от времени.

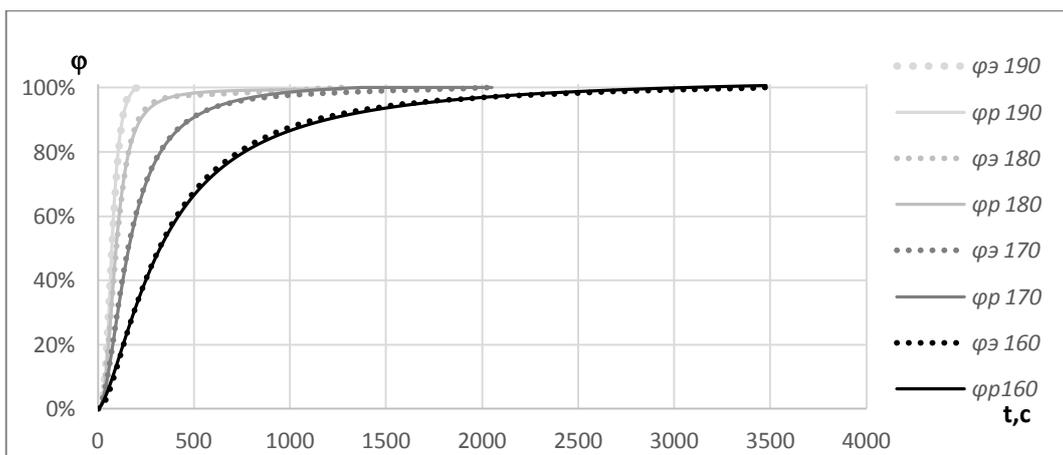


Рисунок 4.10 – Экспериментальная и расчетная вулканизационные кривые для материала 2, при температуре 160,170,180,190°C

Из графика видно, что расчетные кривые достаточно точно воспроизводят экспериментальные, что позволяет применять регрессионное выражение (2) в дальнейших исследованиях. Различие между численными и экспериментальными значениями степени завершенности вулканизации не превышает 1%.

Таким образом, в работе проведено реометрическое исследование трех марок резин, построены вулканизационные кривые, определены коэффициенты для регрессионного выражения вулканизации при разных температурах.

Результаты опубликованы в статье «Описание вулканизационных кривых при помощи трехпараметрического уравнения / И. Я. Дятлов, Н. М. Труфанова // Электротехника. - 2020. - № 11. - С. 34-38. (версия на английском языке A Three-Parameter Equation for Describing Vulcanization Curves / I. Y. Dyatlov, N. M. Trufanova // Russian Electrical Engineering. - 2020. - Vol. 91, № 11. – P. 681-685, индексируется в международной базе цитирования Scopus)».

Результаты исследования могут быть использованы при математическом моделировании технологического процесса вулканизации. А также для определения степени завершенности вулканизации изделия с заданными параметрами технологического режима или при заданной величине степени вулканизации определить наиболее рациональные параметры технологического процесса для различных резиновых смесей.

#### **4.3 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ**

1. Проведены натурные эксперименты по определению вулканизационных характеристик резиновых смесей. Это позволило получить кривые зависимости крутящего момента от времени и температуры.

2. Построены кривые вулканизации для различных температур выдержки, что позволило провести качественный и количественный анализ влияния температуры на процесс вулканизации.

3. Предложено регрессионное уравнение, описывающее процесс вулканизации резины. Данное выражение позволило описать процесс кинетики вулканизации в зависимости от времени и температуры.

4. Определены температурные зависимости коэффициентов регрессионного уравнения, что позволило уточнить зависимость процесса вулканизации от температуры.

5. Сформирована база данных, позволяющая использовать полученные и статистически обработанные экспериментальные результаты при реализации СППР.

## **ГЛАВА 5. АНАЛИЗ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

В результате решения системы дифференциальных уравнений методом конечных объемов в программном пакете ANSYS FLUENT было получено распределение температуры по длине и радиусу заготовки, изменение степени завершенности процесса вулканизации резиновой изоляции по толщине изоляции и длине вулканизационной трубы. Проведен анализ закономерностей теплового процесса и процесса вулканизации. Определено влияние технологических, теплофизических и кинетических параметров на процесс сшивки. Приведена реализация адаптационного механизма управления процессом вулканизации изоляции кабеля. Определено преобладающее значения ряда параметров для выбранного метода управления процессом.

### **5.1 АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ВУЛКАНИЗАЦИИ**

Реализация разработанной пространственной математической модели процессов теплопереноса и кинетики вулканизации в вулканизационной трубе с кабелем с резиновой изоляцией (1)-(10) методом конечных объемов в среде программного комплекса ANSYS FLUENT позволила получить ряд закономерностей процессов, определить поля температур, скоростей и степени сшивки во всем объеме исследуемого объекта.

В работе рассмотрены две марки резин: ТСШ-33, EPR

Исходные значения теплофизических характеристик приведены в таблицах 5.1. Геометрия кабеля и вулканизационной трубы представлена в таблице 5.2. Значение технологических параметров представлено в таблице 5.3

Для анализа закономерностей исследуемого процесса, определения наиболее значимых факторов, влияющих на завершенность процесса вулканизации изоляции кабеля, и определения оптимальных алгоритмов

управления процессом в работе проведен ряд численных экспериментов, исходные данные которых приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.1 – Теплофизические свойства материалов

Материал	$\lambda$ , Вт/м <sup>°С</sup>	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$C$ , Дж/кг <sup>°С</sup>
Изоляция	0,4	1400	2000
Жила (медь)	387,6	8978	381
Пароводяная среда	0,6	1000	4182

Таблица 5.2 – Геометрия кабеля и вулканизационной трубы

Диаметр ТПЖ, мм	Диаметр по изоляции, мм	Диаметр трубы, мм	Длина трубы, м
13	15	100	83

Таблица 5.3 – Технологические параметры процесса

$P$ , атм	$T$ пара, °С	$V$ , м/мин
11	180	10

Таблица 5.4 – Варианты численных экспериментов

№	Диз, мм	Стпж, мм <sup>2</sup>	резина	$T_{вулк}$ , °С	$v$ , м/мин	$\lambda_{из}$ , Вт/м <sup>°С</sup>	$T_{из}$ , °С	$T_{тпж}$ , °С	$\phi$ , %
1	2	95	EPR	180	10	0,4	80	80	93,27
2	1	95	EPR	180	10	0,4	80	80	96
3	3	95	EPR	180	10	0,4	80	80	84,4
4	4	95	EPR	180	10	0,4	80	80	69,55
5	2	50	EPR	180	10	0,4	80	80	96,04
6	2	120	EPR	180	10	0,4	80	80	91,23
7	2	95	EPR	157	10	0,4	80	80	33,53
8	2	95	EPR	165	10	0,4	80	80	44,05
9	2	95	EPR	171	10	0,4	80	80	60,14
10	2	95	EPR	176	10	0,4	80	80	74,38
11	2	95	EPR	185	10	0,4	80	80	95,44

№	Диз, мм	Стпж, мм <sup>2</sup>	резина	Твулк, °С	v, м/мин	λиз, Вт/м°С	Тиз,°С	Ттпж, °С	φ, %
12	2	95	EPR	188	10	0,4	80	80	97,92
13	2	95	EPR	192	10	0,4	80	80	100
14	2	95	EPR	202	10	0,4	80	80	100
15	2	95	EPR	205	10	0,4	80	80	100
16	2	95	EPR	180	6	0,4	80	80	100
17	2	95	EPR	180	8	0,4	80	80	95
18	2	95	EPR	180	12	0,4	80	80	84,79
19	2	95	EPR	180	14	0,4	80	80	72,47
20	2	95	EPR	180	16	0,4	80	80	57,74
22	2	95	EPR	180	10	0,2	80	80	85,20
23	2	95	EPR	180	10	0,6	80	80	94,20
24	2	95	EPR	180	10	0,4	20	80	92,90
25	2	95	EPR	180	10	0,4	60	80	88,91
27	2	95	EPR	180	10	0,4	80	100	93,57
28	2	95	EPR	180	10	0,4	80	120	93,87
29	2	95	ТСШ	180	10	0,4	80	80	99,48
30	3	95	ТСШ	180	10	0,4	80	80	96,73
31	4	95	ТСШ	180	10	0,4	80	80	93,61
32	2	95	ТСШ	180	10	0,2	80	80	97,57
33	2	95	ТСШ	180	10	0,6	80	80	99,78

Анализ закономерностей термодинамических и кинетических процессов проводился для исходного варианта 1, таблицы 5.4.

На рис. 5.1 и 5.2 представлены линии тока на длине 2м и поле температур в поперечных сечениях трубы (рис.5.1) и кабеля (рис.5.2) в разных сечениях по длине. Движение пароводной среды в поперечном сечении канала происходит за счет массовых сил с учетом закона Буссинеска. Значения скорости в поперечном

сечении изменяются от 0 до 0,1667 м/с. Несмотря на то, что движение в поперечном сечении неинтенсивно, однако конвективный механизм теплообмена с учетом продольной скорости вносит существенный вклад в тепловой режим в вулканизационной трубе.

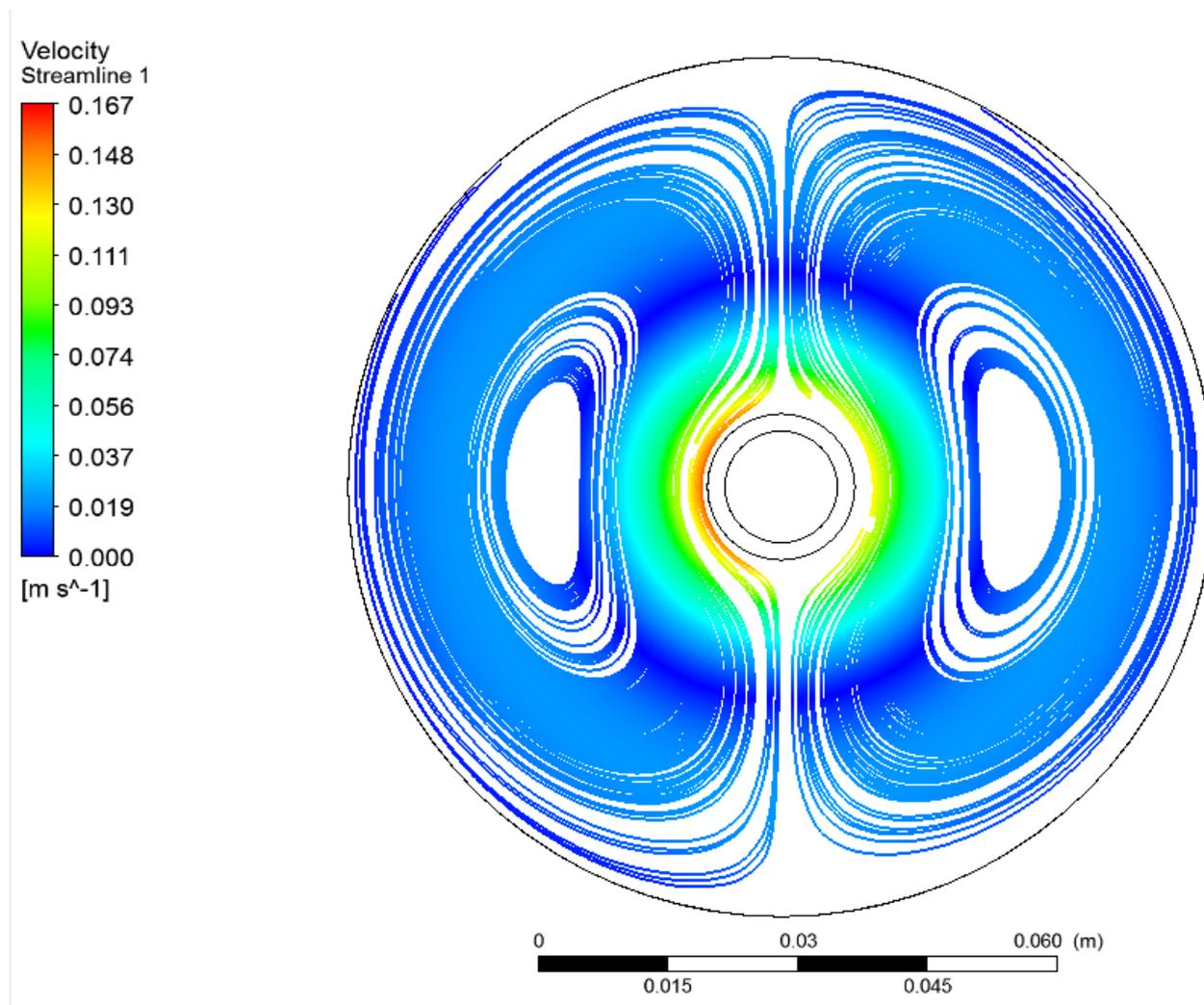


Рисунок 5.1 – Характерные линии тока в поперечном сечении вулканизационной трубы на длине 2м

Как видно из рисунка 5.2, температура на поверхности изоляции ( $T_{из}$ ) на длине 10м достигает величины  $170^{\circ}\text{C}$ , тогда как температура на токопроводящей жиле ( $T_{тпж}$ ) составляет  $120^{\circ}\text{C}$ . При этой температуре ( $120^{\circ}\text{C}$ ) процесс сшивки еще не начался. На длине 10м температуры начала вулканизации ( $140^{\circ}\text{C}$ ) достигли слои составляющие около половины толщины изоляции, и только на 20-метровой длине в процесс сшивки включился весь объем изоляции.

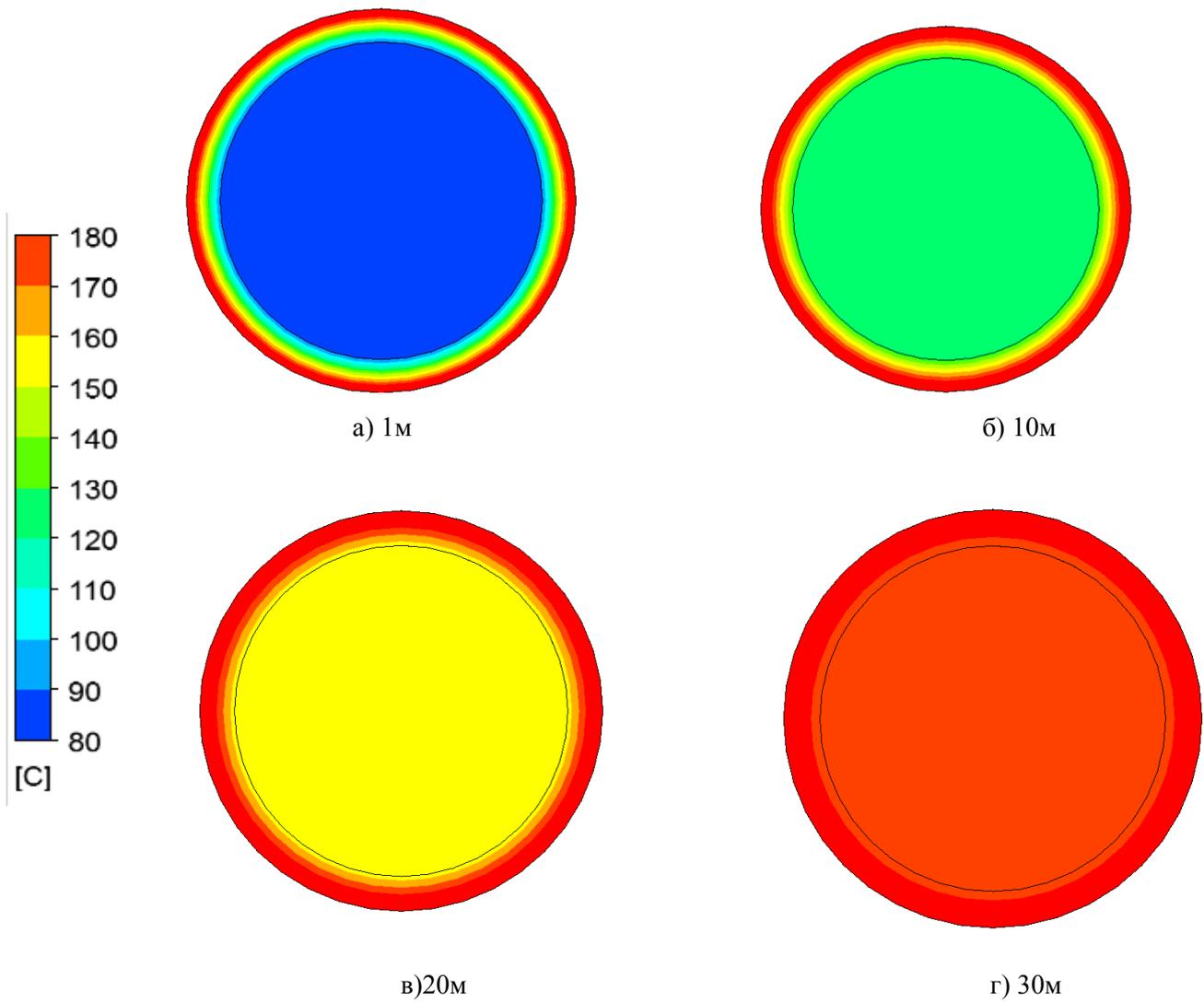


Рисунок 5.2 – Поля температуры на длине а) 1м, б) 10м, в) 20м, г) 30 м

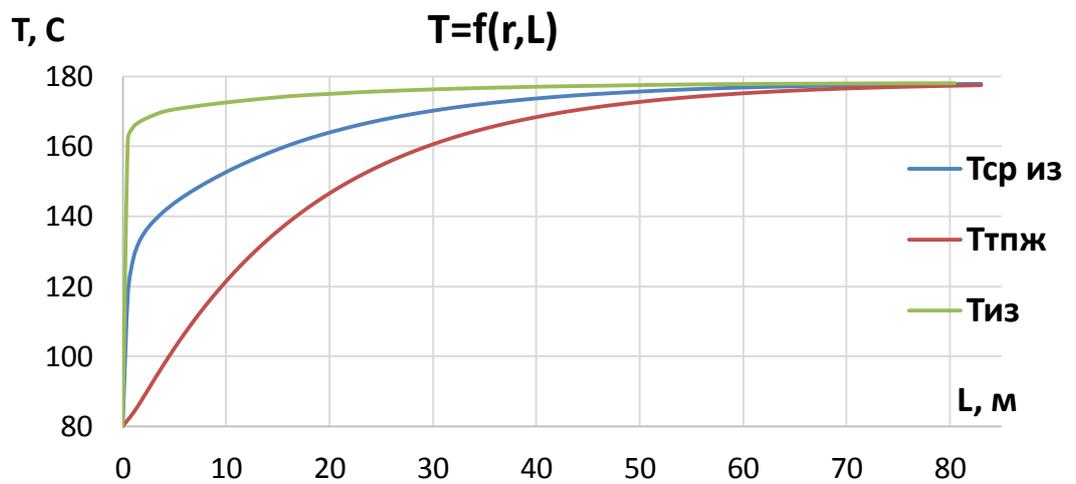


Рисунок 5.3 – Изменение температуры жилы, срединного слоя и поверхности изоляции по длине

На рис.5.2. и 5.3 приведено изменение температуры по длине трубы в трех точках изоляционного слоя. Максимальное изменение значения температуры по толщине существенно на первых 30 метрах (от 90°C до 15°C). Выравнивание температуры по слоям происходит только на длине 70-80 метров.

Вследствие значительного градиента температуры в радиальном направлении, что обусловлено низкой теплопроводностью резины, и времени воздействия процесс вулканизации резины протекает с разной скоростью. Характерное изменение степени завершенности процесса вулканизации в зависимости от радиуса изоляции и длины трубы приведено на рис. 5.4.

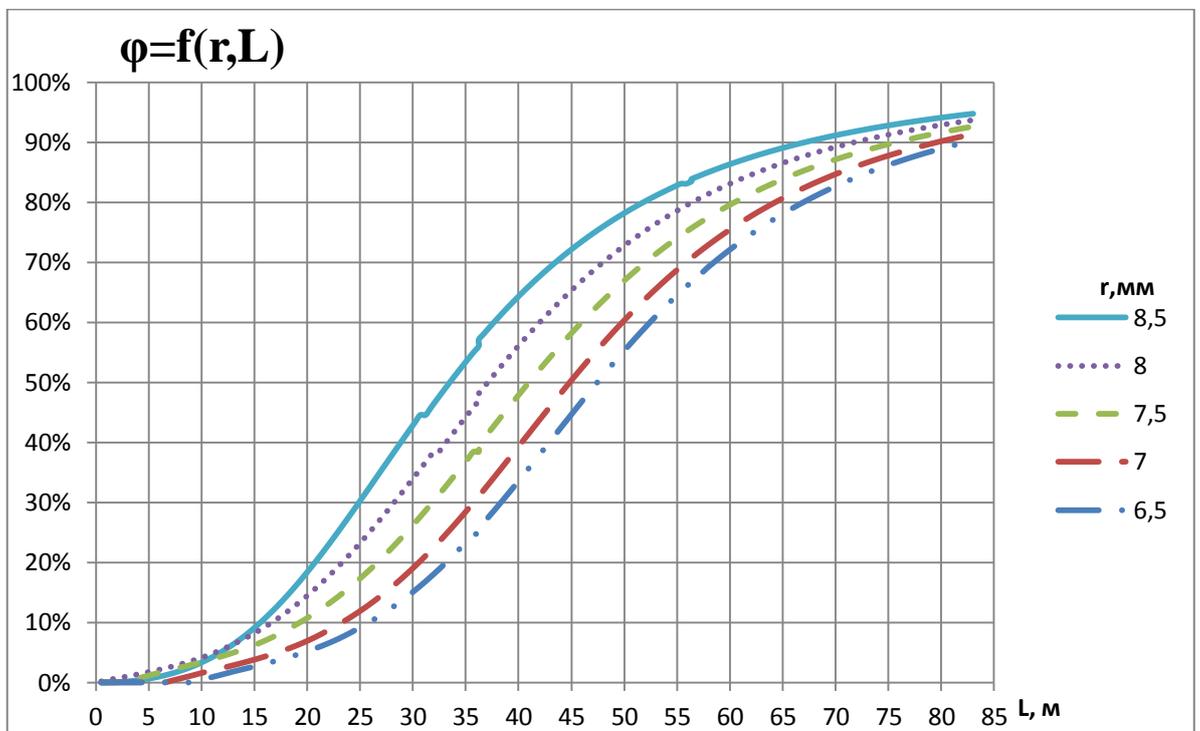


Рисунок 5.4 – Изменение степени вулканизации по радиусу и длине вулканизационной трубы

Из рисунка 5.4. видно, что степень завершенности процесса существенно различна для внутренних слоев изоляции. Так на длине 45 м (середина трубы) на поверхности изоляции степень сшивки достигает 70%, а на поверхности жилы лишь 45%.

## 5.2. ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НА ПРОЦЕСС ВУЛКАНИЗАЦИИ

В связи с тем, что теплофизические свойства резиновой смеси зависят от марки резины, ее рецептуры, важным при разработке алгоритма управления производственным процессом оценить их влияние на степень завершенности вулканизации, а, следовательно, и качество изделия. Такое исследование важно для определения тех параметров, значения которых необходимо определять на входном контроле и иметь в базе данных.

Зависимость величины теплоемкости от температуры для двух марок резины NEPR и ТСШ -33 (рис 5.6) была получена экспериментально при помощи дифференциальной сканирующей калориметрии на приборе DSQ 2000.

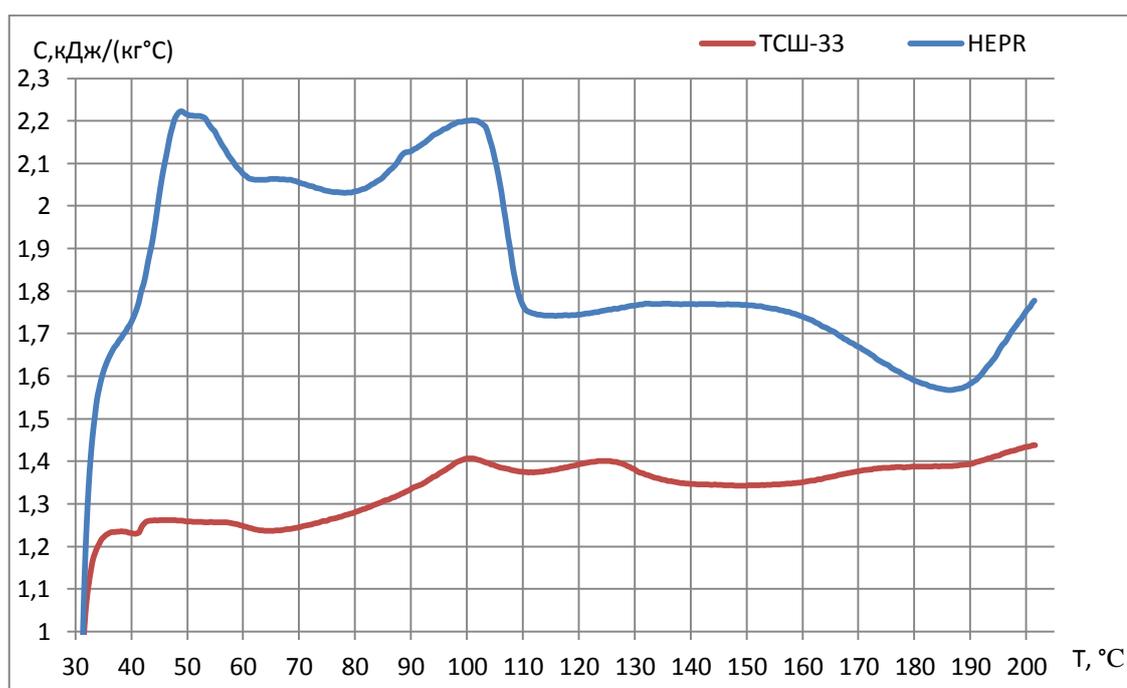


Рисунок 5.6 – Зависимость удельной теплоемкости от температуры и марки резины

Как видно из зависимости (рис 5.9) после размягчения материала (температуре выше 100)°С) теплоемкость NEPR составляет  $1800 \pm 200$  Дж/(кг °С), для резины марки ТСШ-33  $1400 \pm 100$  Дж/(кг °С). Максимальная разница составляет более 25%

В работе были рассмотрены предельные значения теплофизических характеристик (максимальное и минимальное значение из температурной зависимости) и определены поля температур и степень сшивки для каждого значения.

Результаты численного эксперимента по определению зависимости температурного поля и степени вулканизации от теплоемкости представлен на рис.5.7.

Из рисунка 5.7 видно, что степень завершенности вулканизации уменьшается с ростом теплоемкости, что обусловлено с увеличением времени прогрева заготовки. Несмотря на существенную разницу в значениях теплоемкости (от 1500 до 2500) степень завершенности вулканизации изменяется не значительно. Так при увеличении теплоемкости на 25% степень завершенности уменьшается на 0,4%.

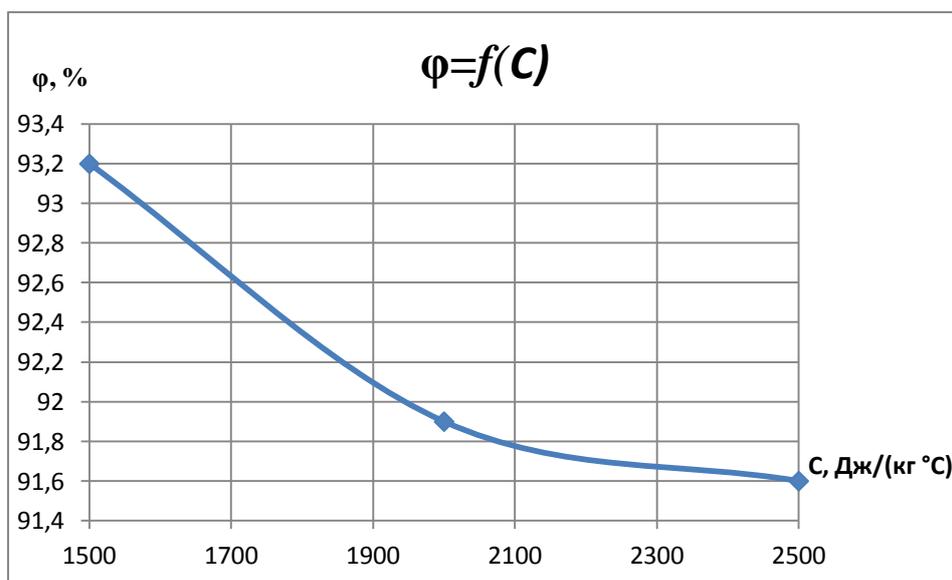


Рисунок 5.7 – Зависимость степени вулканизации от теплоемкости

Зависимость степени завершенности вулканизации от плотности представлена на рисунке 5.8.

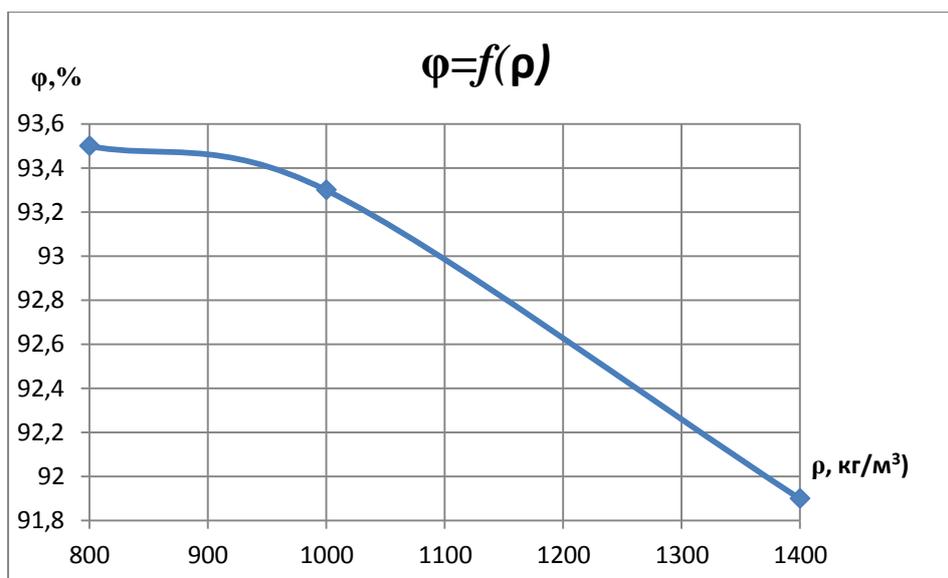


Рисунок 5.8 – Зависимость степени завершенности вулканизации от плотности изоляции

Из анализа графической зависимости можно сделать следующий вывод. Плотность изоляции влияет на степень завершенности не существенно:

При изменении плотности на 40 % степень завершенности меняется на 0,4%. Также заметна аналогичная (рис 5.9) тенденция на снижение степени вулканизации с ростом плотности.

Наибольшим образом на величину завершенности вулканизации влияет коэффициент теплопроводности (рис.5.9). Так при изменении коэффициента теплопроводности с 0,2 до 0,4 степень завершенности вулканизации возрастает на 6% . С ростом коэффициента теплопроводности внутренние слои прогреваются быстрее, следовательно, степень завершенности вулканизации будет выше. Отличие по величине степени сшивки для двух марок резин при величине коэффициента теплопроводности равном 0,2 Вт/м<sup>°С</sup> составляет 14%.

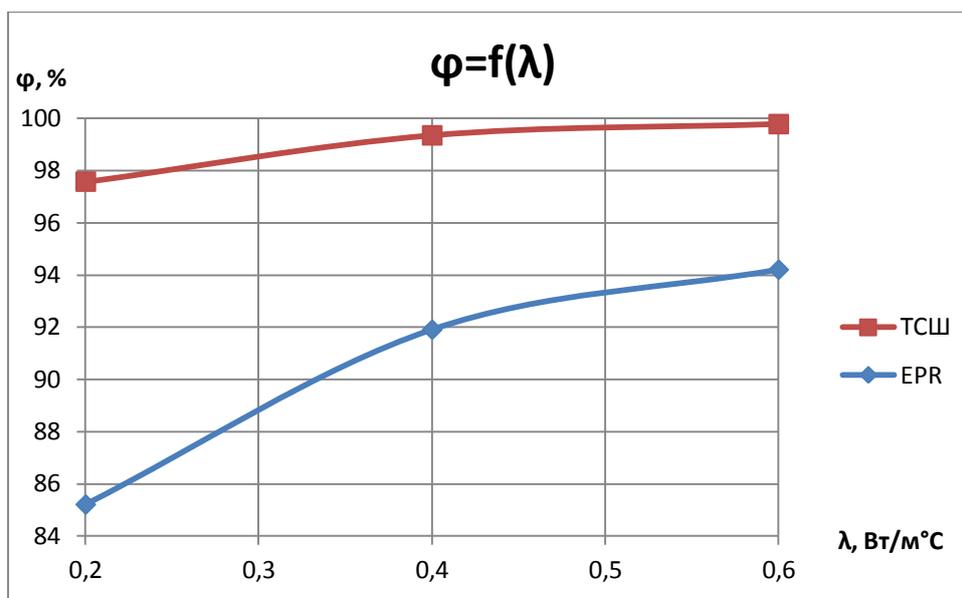
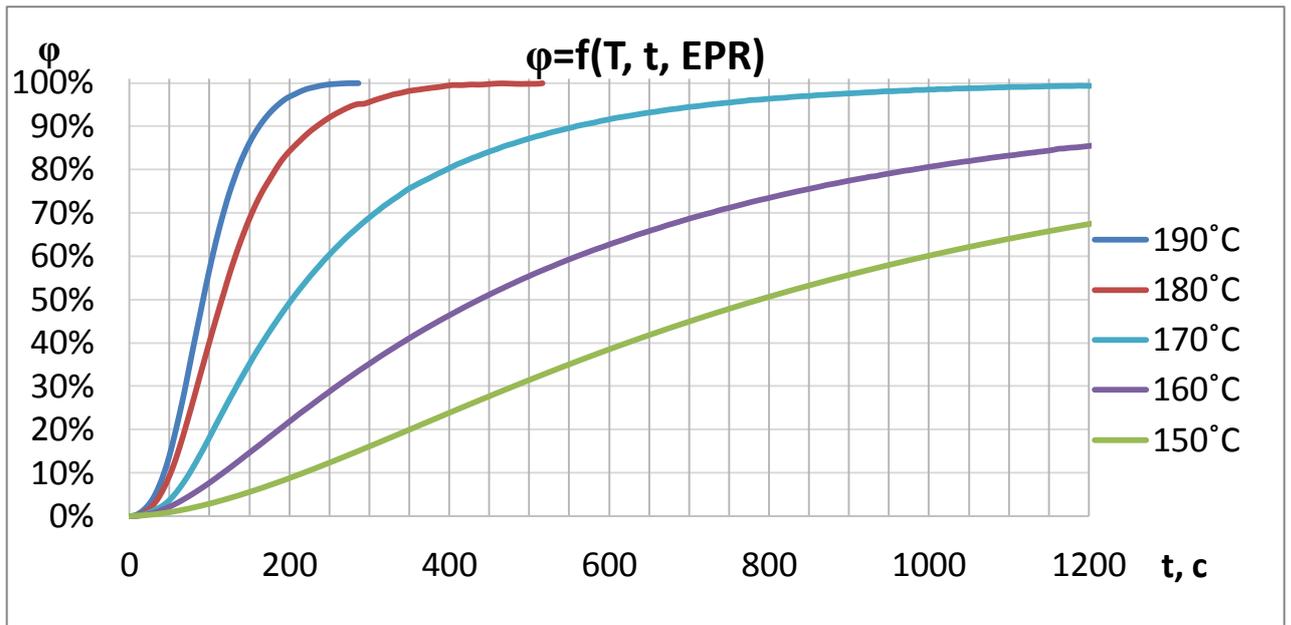


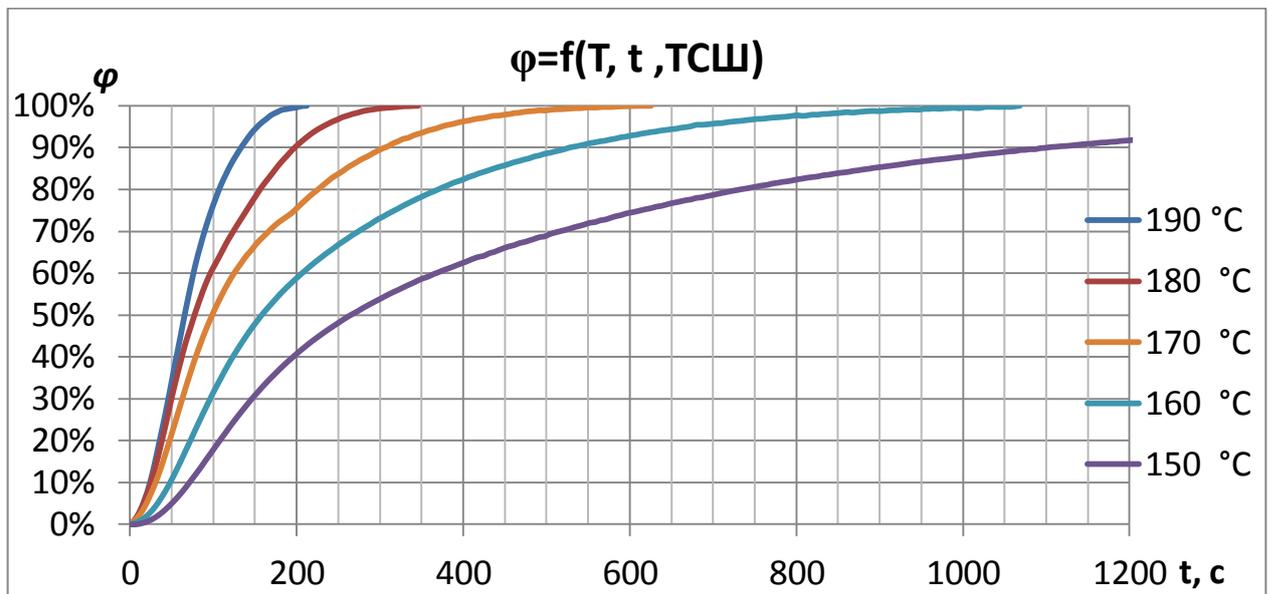
Рисунок 5.9 – Влияние коэффициента теплопроводности на степень завершенности вулканизации для двух марок резин

Анализ процесса сшивки изоляции показал, что влияние таких теплофизических характеристик, как теплоемкость и плотность, на степень сшивки мал. Следовательно, эти параметры можно исключить из рассмотрения при организации процесса управления технологическим процессом.

На рис.5.10 приведены экспериментальные кривые степени сшивки в зависимости от времени и температуры выдержки для двух марок резин. В силу особенностей молекулярного строения процесс вулканизации протекает с разной скоростью. Так для температуры 150°С и времени равному 500с, что соответствует времени прохождения вулканизационной ванны, степень сшивки для резины марки ЕРР составляет 30%, а для ТСШ – 70%. Таким образом, для получения качественно сшитой изоляции в первом случае необходимо уменьшать скорость изолирования, то есть подбирать рациональные значения параметров технологического процесса



а



б

Рисунок 5.10 – Степень завершенности вулканизации в зависимости от температуры и времени выдержки для марок резины а)EPR и б) TCSH-33

### 5.3. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ГЕОМЕТРИИ ЗАГОТОВКИ НА ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И КИНЕТИКИ

Важными технологическими параметрами процесса изготовления высоковольтных кабелей с резиновой изоляцией являются: давления пара, от

величины которой зависит величина температуры пароводяной среды (насыщенного пара), зависимость представлена на рис.5.11 и величина скорости продвижения заготовки по вулканизационной трубе (скорость изолирования), определяющая производительность линии. При изменении давления в вулканизационной трубе, что часто происходит в реальном процессе производства кабелей с резиновой изоляцией, необходимо подобрать оптимальный режим, позволяющий получить удовлетворительное качество изделия.

На практике давление в вулканизационной трубе может по ряду причин снижаться на 10-12%. Как видно из рис. 5.11 это приводит к уменьшению температуры среды вулканизации.

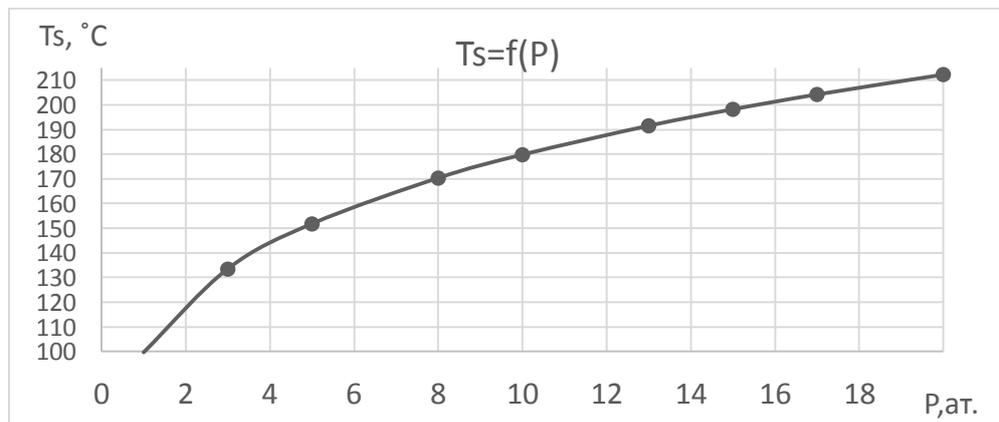


Рисунок 5.11 – Зависимость температуры пара от давления

Влияние температуры среды вулканизации на степень сшивки слоя изоляции у поверхности жилы для разных скоростей изолирования приведено на рис.5.12.

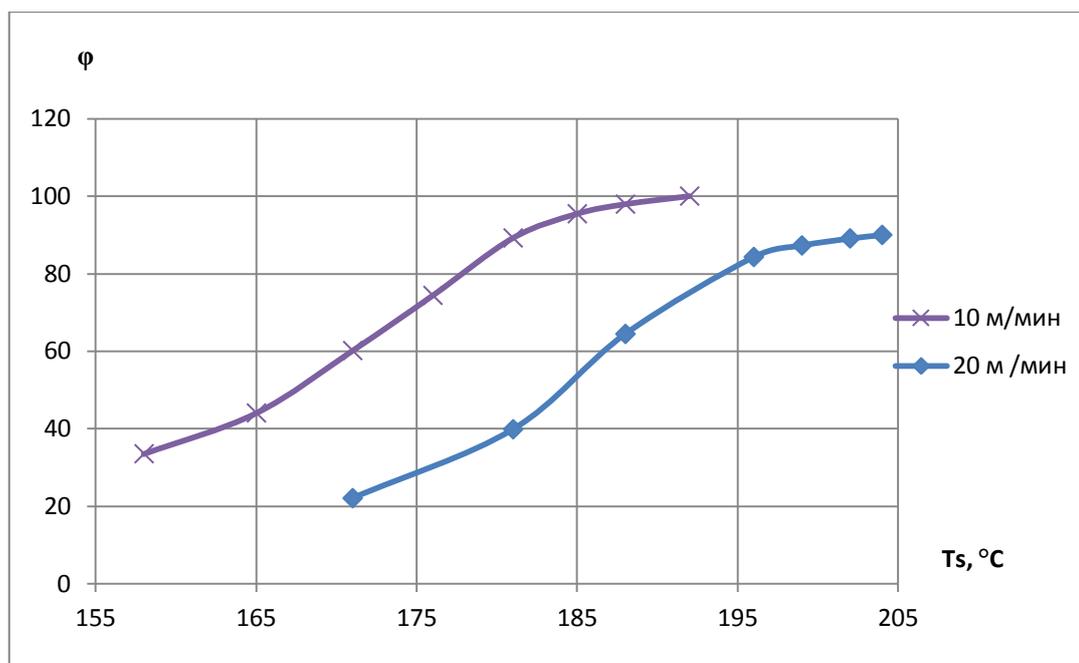


Рисунок 5.12 – Влияние температуры пароводяной среды на степень сшивки.

Из полученных зависимостей (рис. 5.12) можно сделать следующее заключение. Уменьшение температуры с 185 до 175°C приводит к снижению степени сшивки на выходе из вулканизационной трубы на 30%.

Увеличение скорости изолирования с 10 м/мин до 20 м/мин влечет за собой изменение температурного поля в изоляции и, как следствие, приводит уменьшению величины степени сшивки.

Увеличение скорости изолирования в 2 раза снижает величину степени сшивки более, чем в 2 раза для исходного варианта 1, таблица 5.4. Однако при увеличении температуры среды до 195°C возможно увеличение производительности с приемлемой для производства степенью сшивки в 85%.

На рис. 5.13 Приведена зависимость степени сшивки от скорости изолирования для сечения 95 и толщины изоляции 3, 4 мм

Очевидно, что при установленной температуре среды вулканизации, значения скорости превышающие 10м/с являются не приемлемыми.

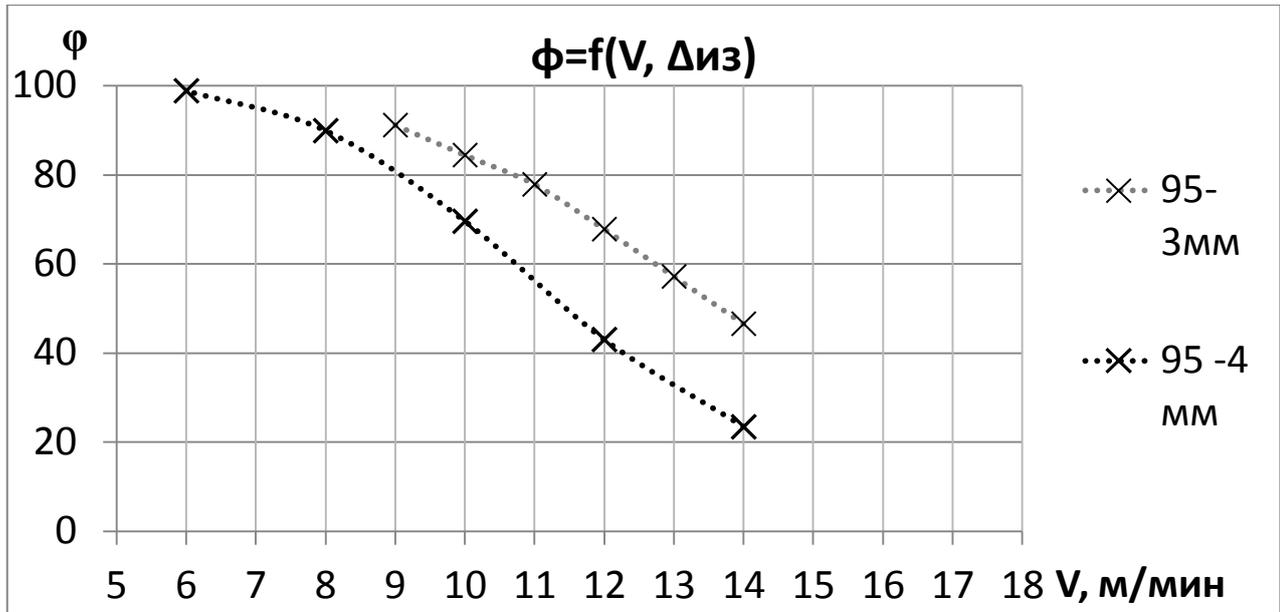


Рисунок 5.13 – Влияние скорости изолирования на величину степени сшивки

Поскольку в вулканизационную трубу заготовка может поступать с различной температурой жилы и изоляционного слоя, было исследовано влияние этих параметров на рассматриваемые процессы, варианты 24-28, таблица 5.4. Результаты исследования приведены на рис. 5.14 5.15.

Очевидно, что влияние на степень сшивки температур жилы и изоляции на входе в вулканизационную трубу незначительно. Величина степени сшивки и в том и другом случае изменяется на доли процента. Таким образом, эти параметры можно исключить из списка значимых при разработке алгоритма управления технологического процесса.

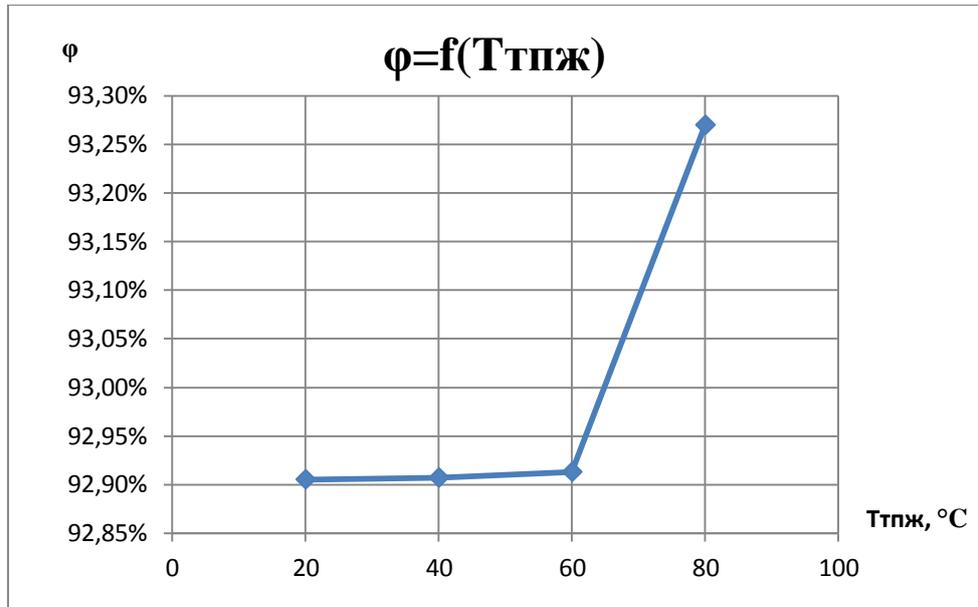


Рисунок 5.14 – Влияние температуры жилы на степень вулканизации

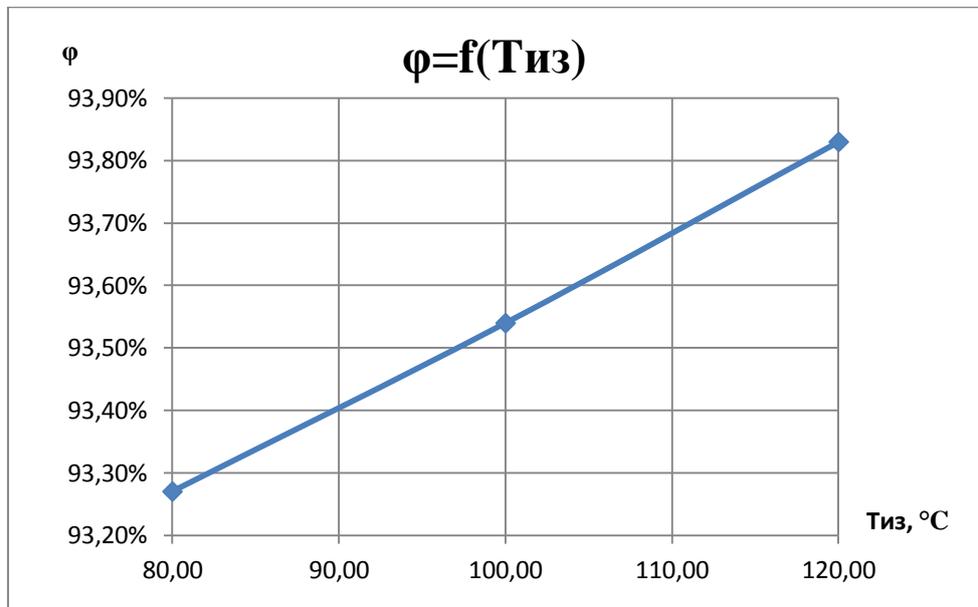
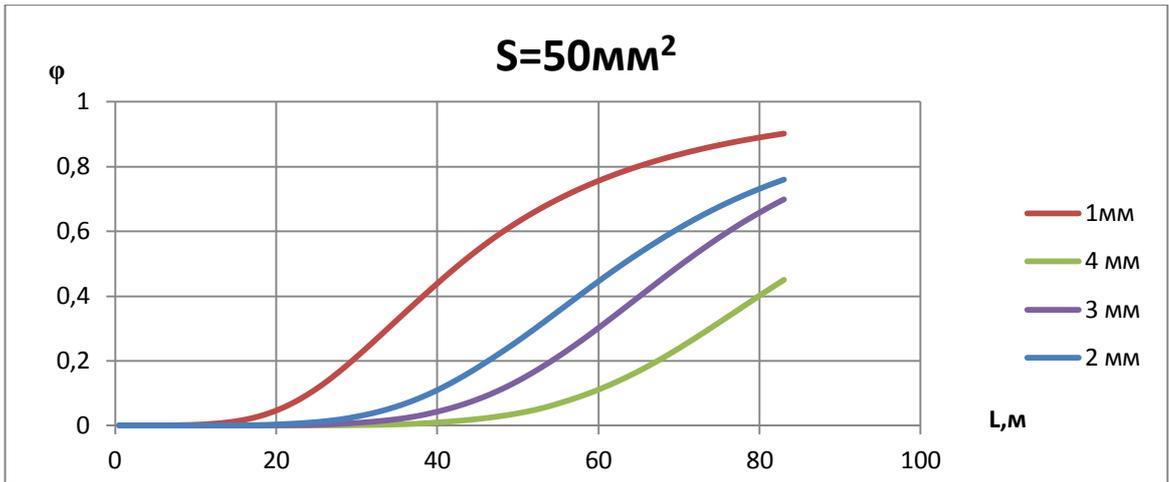
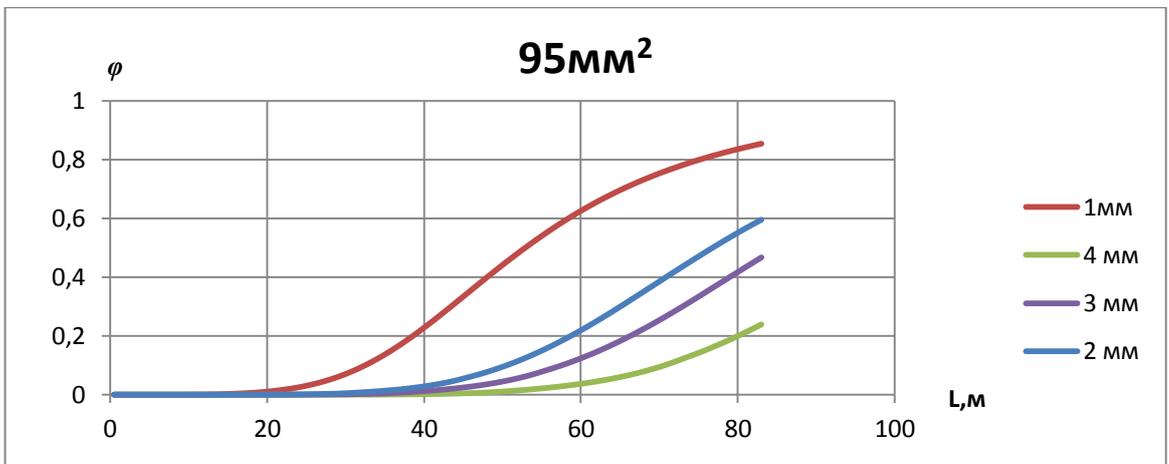


Рисунок 5.15 – Влияние температуры изоляции на степень вулканизации

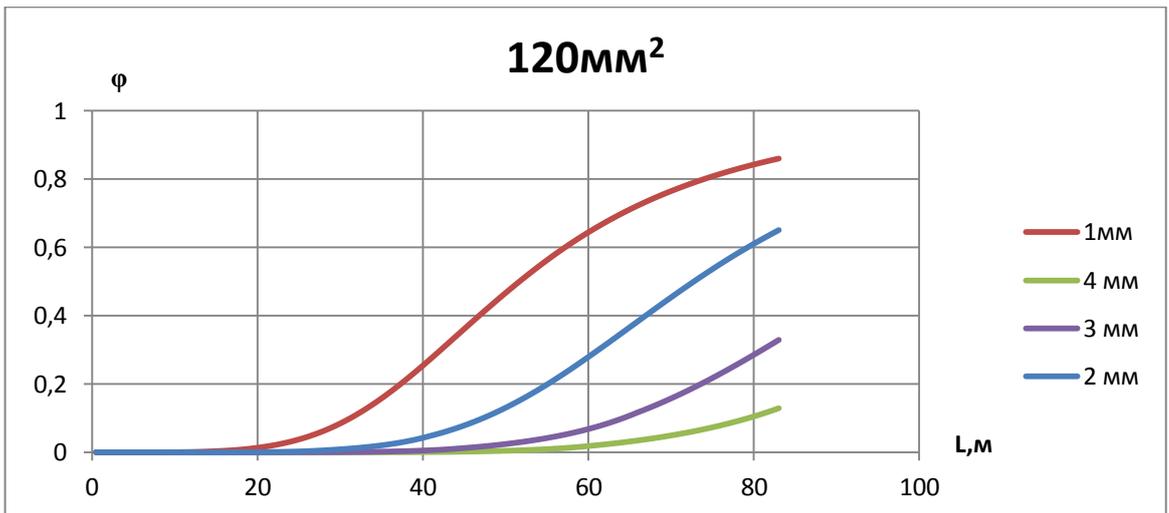
Производство кабелей с резиновой изоляцией представляет собой широкий номенклатурный ряд изделий, отличающийся прежде всего геометрией изделия. Для процесса термической вулканизации особенно значимыми являются диаметр металлической жилы и толщина изоляции. Анализ влияния толщины изоляции на изменение степени сшивки по длине и в поперечном сечении кабеля представлены на рис. 5.16 а, б, в.



а



б



в

Рисунок 5.16 – Влияние геометрии заготовки на процесс сшивки по длине трубы для сечения а)-50, б)-95, в)-120 мм<sup>2</sup>

Чем больше толщина изоляции, тем существенно меньше степень сшивки на выходе из вулканизационной трубы при прочих равных условиях. Это значит, что для каждого из значений толщины изоляции необходимо подбирать величину скорости заготовки.

Анализ влияния площади поперечного сечения жилы позволил сделать вывод о том, что для малых значений толщин увеличение диаметра жилы не приводит к существенному изменению степени сшивки. Для толщин 3 и 4мм отличие достигает существенных величин, так для 4-х миллиметровой толщины изменение площади поперечного сечения жилы с 50 до 120 мм<sup>2</sup> приводит к снижению степени вулканизации в 4 раза, что также, как и в случае изменения толщины изоляции требует корректировки в скорости изолирования.

#### **5.4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Для реализации адаптивного метода управления процессом производства кабелей с резиновой изоляцией необходимо сформировать базу данных с различными вариантами исходных параметров, на основе которой формируется вектор управляющих воздействий. Чаще всего определяется скорость движения заготовки и производительность экструдера для обеспечения заданной толщины изоляции.

Для оценки влияния, скорости изолирования, площади поперечного сечения жилы и толщины изоляции на степень сшивки была произведена серия расчетов для резины марки СЗПВ. Результаты в виде семейства кривых, представлены на рисунке 5.17-5.19

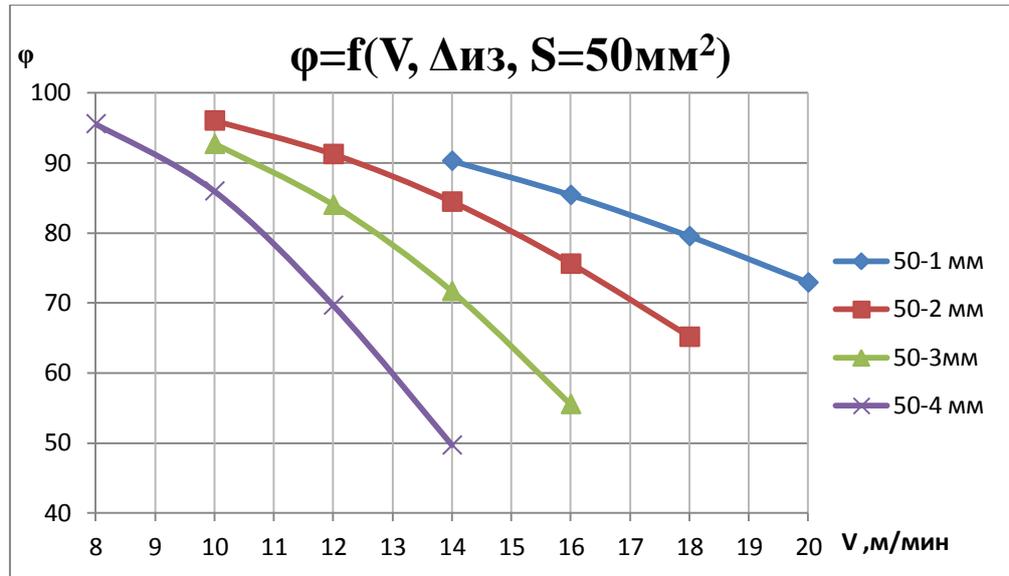


Рисунок 5.17 – Зависимость степени завершенности вулканизации от скорости и толщины изоляции на сечении  $50 \text{ мм}^2$

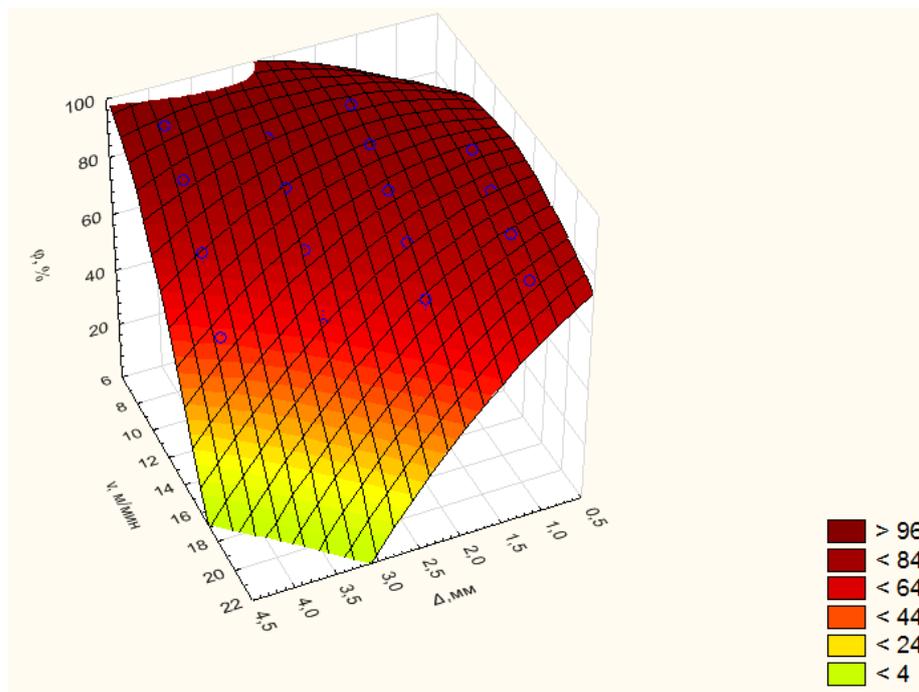


Рисунок 5.18 – Зависимость степени завершенности вулканизации от скорости и толщины изоляции на сечении  $50 \text{ мм}^2$

Исходя из графика (рис.5.17-5.18) можно заметить, что при толщине изоляции 4 мм скорость должна быть не менее 9 м/мин., при этом достигается степень вулканизации не менее 90%. При толщине изоляции 1 мм – скорость 14

м/мин. При этом производительность линии снижается на 30%, а производительность экструдера

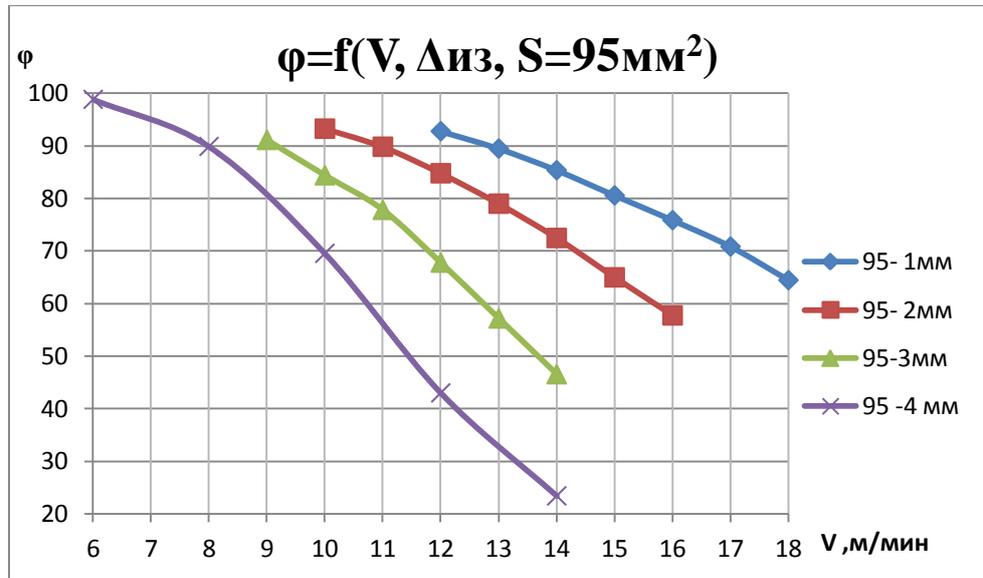


Рисунок 5.19 – Зависимость степени завершенности вулканизации от скорости и толщины изоляции на сечении 95 мм<sup>2</sup>

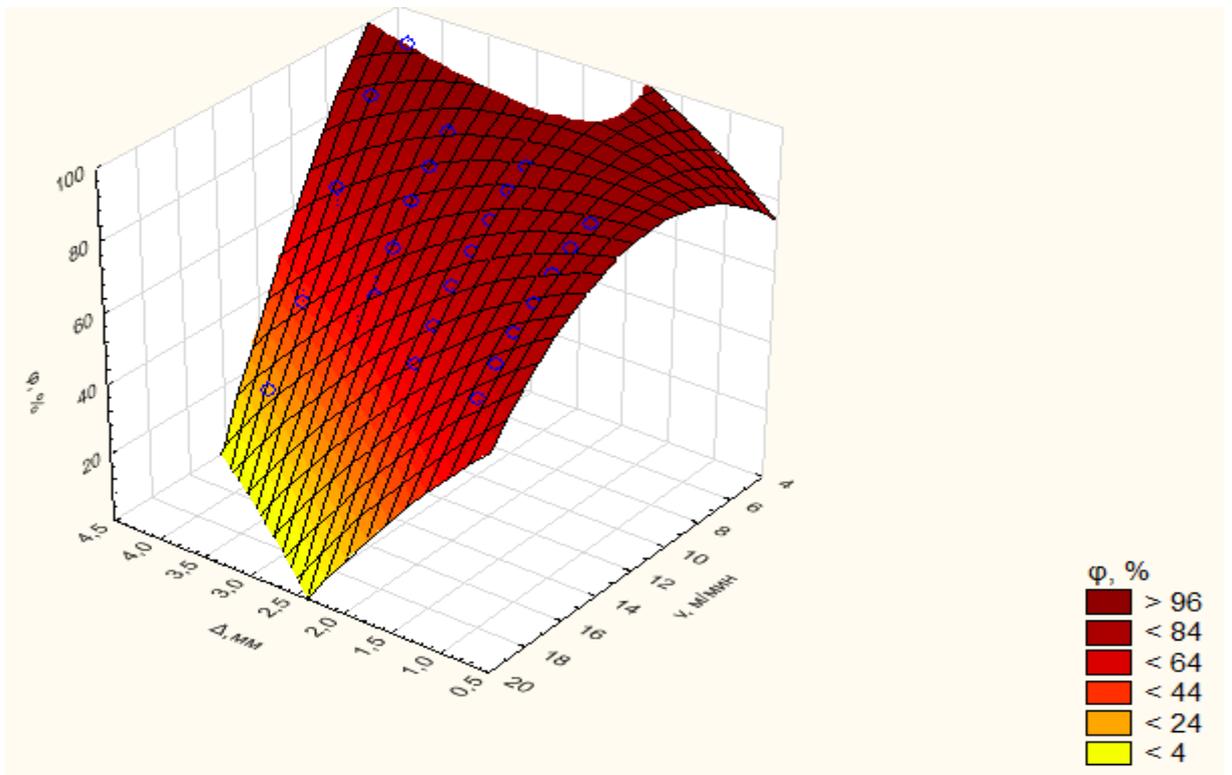


Рисунок 5.20 – Зависимость степени завершенности вулканизации от скорости и толщины изоляции на сечении 95 мм<sup>2</sup>

Исходя из графика (рис.5.19-5.20) можно заметить, что при толщине изоляции 4 мм скорость должна быть не менее 8м/мин., при этом достигается степень вулканизации не менее 90%. При толщине изоляции 1 мм– скорость 13 м/мин.

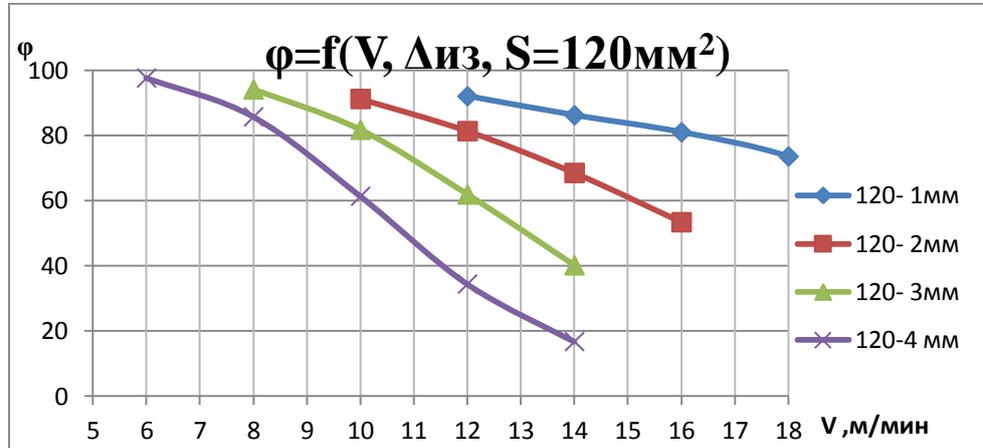


Рисунок 5.21 – Зависимость степени завершенности вулканизации от скорости и толщины изоляции на сечении 120 мм<sup>2</sup>

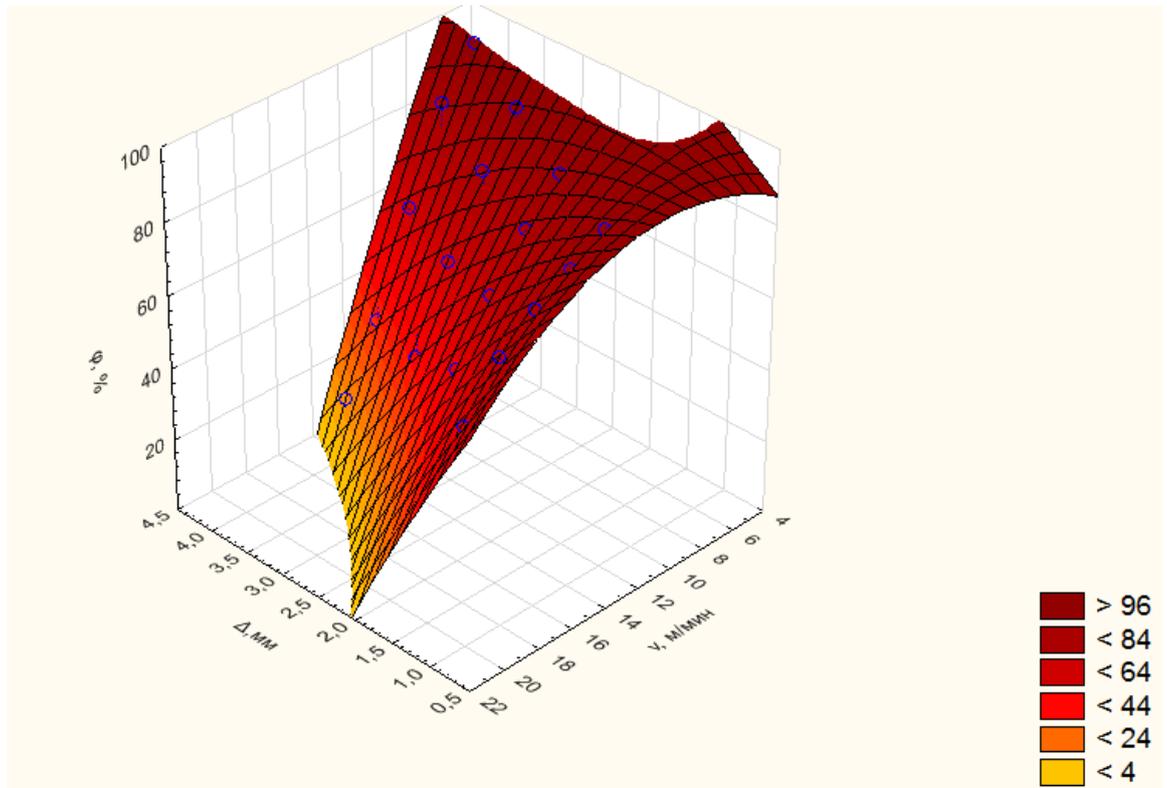


Рисунок 5.22 – Зависимость степени завершенности вулканизации от скорости и толщины изоляции на сечении 120 мм<sup>2</sup>

Исходя из графика (рис.5.21-5.22) можно заметить, что при толщине изоляции 4 мм скорость должна быть не менее 7,5м/мин., при этом достигается степень вулканизации не менее 90%. При толщине изоляции 1 мм– скорость 12,5 м/мин.

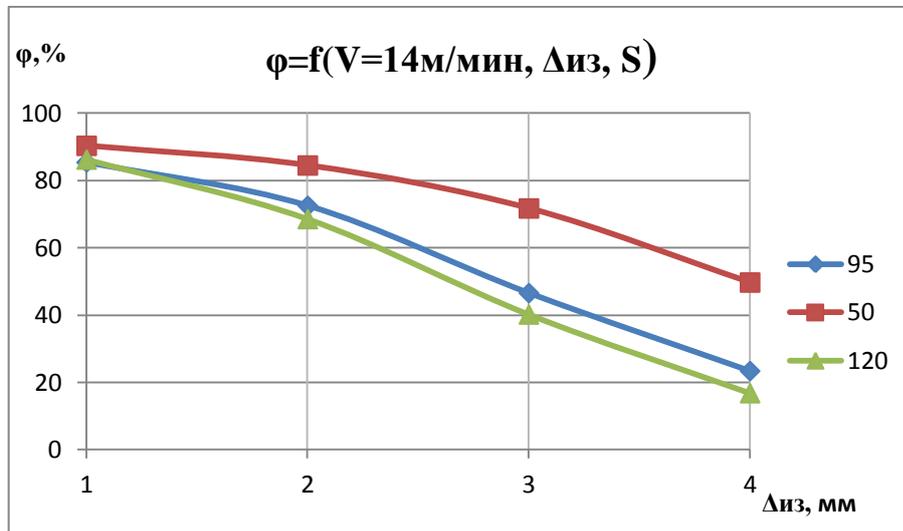


Рисунок 5.23 – Зависимость степени завершенности вулканизации от толщины и сечения ТПЖ при скорости 14 м/мин

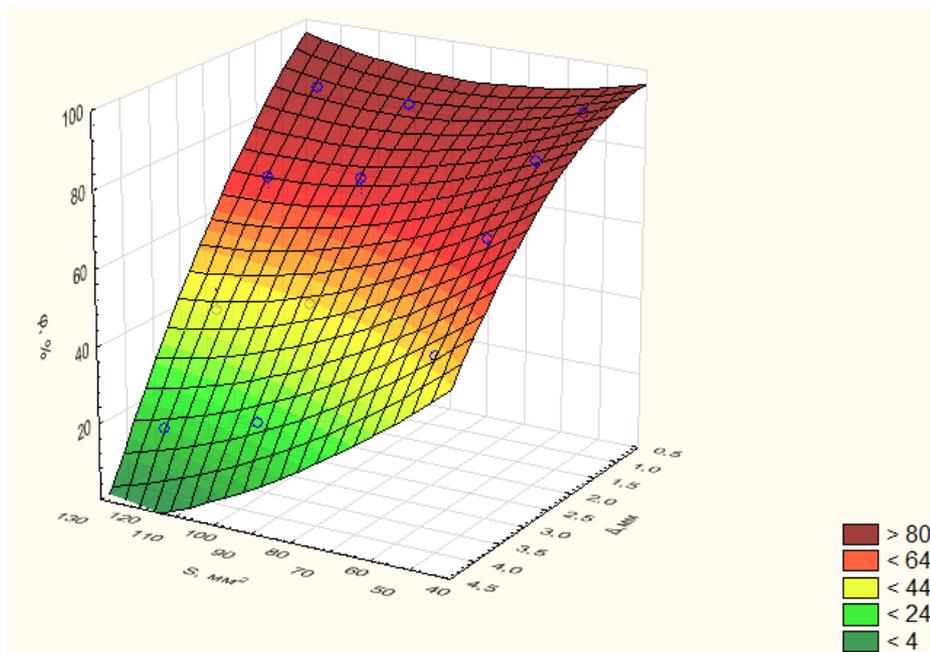


Рисунок 5.24 – Зависимость степени завершенности вулканизации от толщины и сечения ТПЖ при скорости 14 м/мин

Для оценки влияния толщины изоляции на степень завершенности вулканизации рассмотрены три стандартных сечения ТПЖ (50,95,120) мм<sup>2</sup> и

четыре варианта толщины изоляции(1,2,3,4)мм. Величина скорости линии была зафиксирована на 14м/мин, а температуры пара - 180°C. В результате серий расчетов была получена зависимость степени завершенности вулканизации от толщины изоляции, графическая зависимость представлена на рисунках 5.23-5.24.

Как видно из графика (рис 5.23-5.24) зависимость степени завершенности вулканизации (СЗВ) от толщины носит нелинейный характер. Так для сечения 50мм<sup>2</sup> при изменении толщины изоляции с 1 мм до 2 мм, СЗВ меняется на 5%, а при изменении с 3мм до 4мм уменьшается на 20%.

Проанализировав все зависимости, объединив данные скоростей при которых степень завершенности вулканизации составляет 90% можно прийти к следующим зависимости скорости изолирования от толщины изоляции и поперечного сечения ТПЖ (рис 5.25).

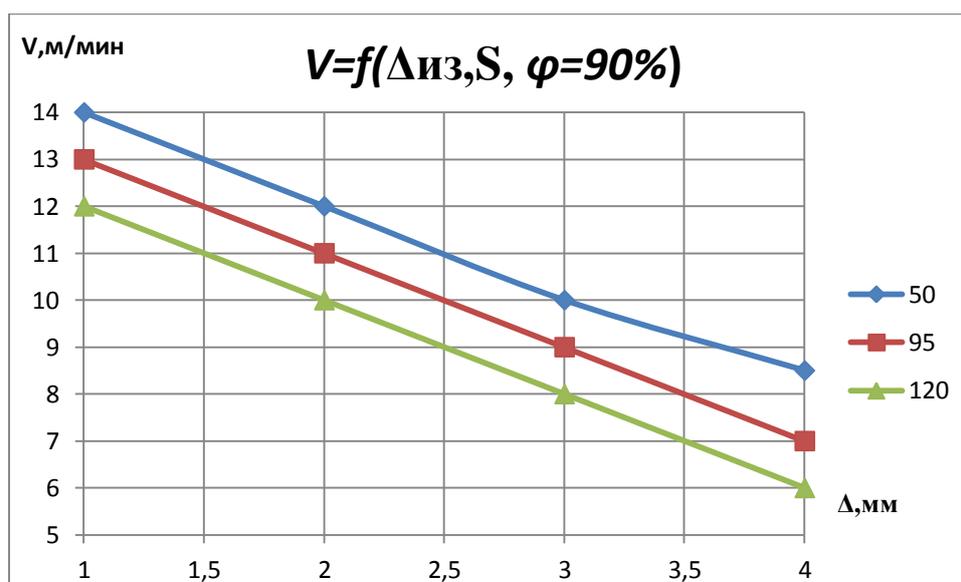


Рисунок 5.25 – Зависимость скорости от толщины изоляции и площади ТПЖ, при которой степень завершенности составит 90%

Из рисунка 5.25 можно сделать вывод, что на величину степени завершенности вулканизации в большей степени влияет толщина изоляции, так при увеличении толщины на 1 мм скорость снижается на 2м/мин, а при изменении сечения в среднем на 1 м/мин.

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет анализировать процесс вулканизации и определять необходимые параметры

технологического режима для новых конструкций кабеля и материалов изоляции с новыми свойствами или в случае перехода к нестандартным технологическим параметрам процесса.

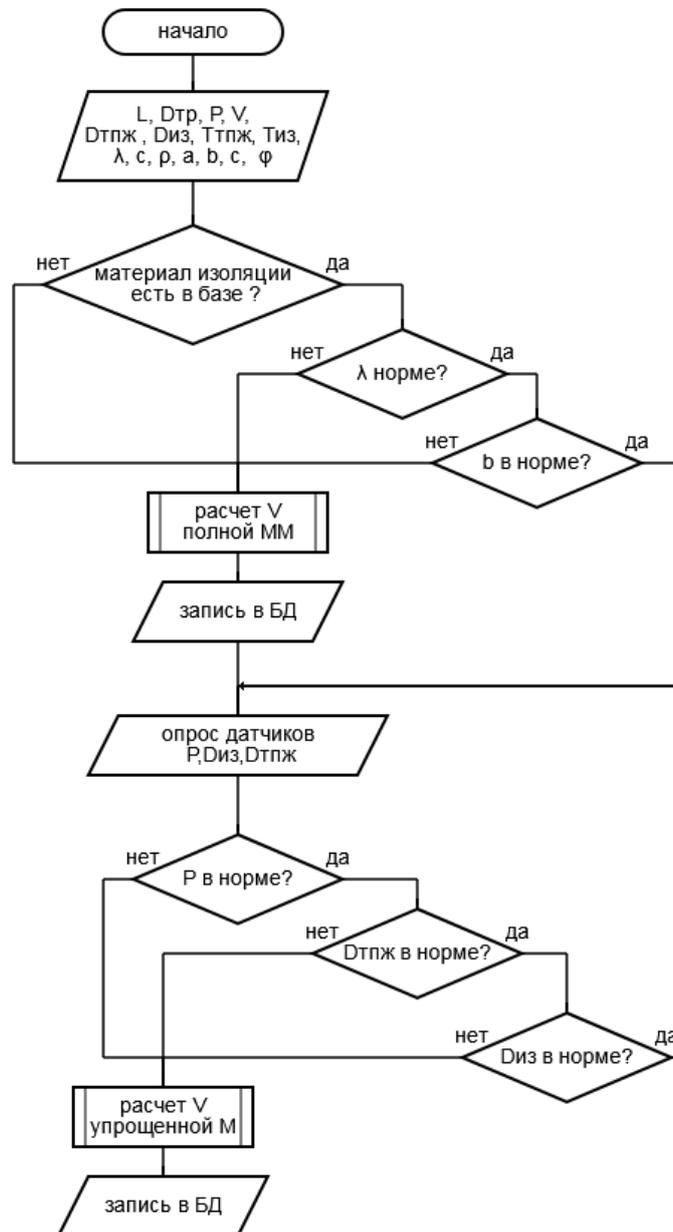


Рисунок 5.26 – Алгоритм коррекции скорости

Основные результаты приведены в статье «Численное исследование влияния технологических параметров на степень завершенности вулканизации изоляции кабеля / И. Я. Дятлов, Н. М. Труфанова // Научно-технический вестник Поволжья. - 2022. - № 8. - С. 17-20.»

Анализ влияния величин на степень завершенности вулканизации позволил выявить, значимые величины такие как, теплопроводность и вулканизационные характеристики материала изоляции, диаметр ТПЖ, толщина изоляции, давление (температура) вулканизационной среды.

Для коррекции скорости линии непрерывной вулканизации предложен алгоритм (рис. 5.26), основанный на работе с полной и упрощенной математическими моделями.

На первом этапе проверяется наличие марки материала в базе данных, при его наличии в базе, поскольку значения величин теплофизических и кинетических характеристик материала данной марки могут изменяться (замена компонентов наполнителя смеси, для отечественных и зарубежных производителей) то производится сравнение величины коэффициента теплопроводности и кинетического параметра вулканизации  $b$  с имеющимися в БД. При отсутствии в базе материала или несоответствии параметров происходит перерасчет всего технологического процесса при помощи полной математической модели.

Далее происходит опрос датчиков диаметра ТПЖ и изоляции, а также давления (температуры) пара, при обнаружении несоответствий с заданными величинами. В случае удовлетворения условия выбирается режим из БД, в ином случае происходит перерасчет параметров технологического режима и результаты расчета заносятся в БД.

## **5.5 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**

При разработке технологического режима для новой линейки маркоразмеров кабеля требуется учитывать множество факторов и производить ряд расчетов, занимающих значительное время. Так, например, перед применением новой резиновой смеси необходимо провести ряд натуральных экспериментов по определению вулканизационных свойств. Далее необходимо понимать, подходит ли данная смесь для конкретного изделия или нет, провести

расчеты технологического режима с целью определения оптимальной скорости производственной линии и температурного режима.

Тогда как применение СППР на уровне технолога, включающая разработанное математическое и программное обеспечение, позволяет оперативно предложить величины управляющих воздействий, проанализировать влияние размеров заготовки на ход процесса. Заранее просчитать режимы для возможных нештатных ситуаций.

В ходе процесса вулканизации могут возникнуть неожиданные отклонения в параметрах технологического режима, например, падение давления внутри вулканизационной трубы, что, в свою очередь, вызовет снижение температуры вулканизационной среды. Снижение температуры увеличит время протекания процесса вулканизации, в следствии чего требуется корректировка скорости перемещения заготовки внутри вулканизационной трубы.

Таким образом без применения СППР при нештатной ситуации на линии оператор руководствовался опытом и вручную корректировал скорость изолирования при снижении давления, при этом визуально оценить результат перемен при скорости 10 м /мин и длине трубы 100м – он смог бы лишь через 10 минут. С учетом того, что попытка изменить скорость изолирования может быть не одна, затрачивается значительное количество времени и резиновой смеси.

Это приводит к значительным расходам временных и материальных ресурсов. Так 100 метров одной токопроводящей жилы сечением 120мм<sup>2</sup> имеет массу порядка 100кг.

Предложенная СППР на уровне оператора позволяет избежать такой ситуации, так как для диапазона изменения давления пара предложен ряд скоростей для разной толщины изоляции и размера заготовки. Это позволяет оператору сократить время регулирования процессом при нештатной ситуации.

Оценка влияния применения СППР на время принятия решений приведена в таблицах 5.5-5.6. В таблицах приведены осредненные оценки времени работы технолога и оператора при нештатных ситуациях без использования СППР .

Таким образом, применение разработанной СППР позволило существенно сократить время принятия решений технологом и оператором (для технолога и оператора в среднем примерно в 4 раза), что существенно повышает эффективность процесса вулканизации изоляции кабеля.

Таблица 5.5 – Оценка эффективности СППР технолога по времени принятия решений

Рассматриваемая ситуация	Было без СППР, мин	Стало, мин
Изменение размера токопроводящей жилы и толщины изоляции.	20	5
Изменение материала, при условии проведенных заранее экспериментов по определению свойств	20	7
Изменение геометрии и материала	30	5

Таблица 5.6 – Оценка эффективности СППР оператора по времени принятия решений

Рассматриваемая ситуация	Было без СППР, мин	Стало, мин
Изменение геометрии	10	3
Изменение свойств материала	13	2
Изменение давления вулканизационной среды	20	5

## 5.6 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1) Определены закономерности процессов тепломассопереноса и закономерности кинетического процесса во время непрерывной вулканизации кабельной изоляции.

2) Исследовано влияние теплофизических и кинетических характеристик на процесс вулканизации. Наиболее важной величиной является коэффициент теплопроводности резины.

3) Исследовано влияние геометрических параметров кабеля на процесс вулканизации. На процесс вулканизации заметно влияют как размеры токопроводящей жилы, так и толщина изоляции.

4) Исследовано влияние технологических параметров на процесс вулканизации. Скорость и температура окружающей среды заметно влияют на ход процесса вулканизации.

4) В результате анализа определены значимые параметры для управления технологическим процессом, что позволило предложить алгоритм коррекции скорости.

5) В результате численных исследований были построены технологические поверхности, позволяющие существенно расширить базу данных для СППР.

6) Построен алгоритм коррекции скорости, учитывающий только значимые параметры, что позволило сфокусировать внимание только на значимые параметры.

7) Проведена оценка эффективности применения СППР, что позволило увидеть вклад предложенной СППР в снижение времени принятия решения как на уровне технолога, так и на уровне оператора линии непрерывной вулканизации кабельной продукции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа потребностей производства разработана новая концептуальная модель СППР оператора линии непрерывной вулканизации резиновой изоляции кабельно-проводниковой продукции, в состав которой входит база накопленных данных и знания, получаемые от использования математических моделей, описывающих зависимости режимов от размеров изоляции, свойств резиновой смеси и температуры. Применение модели позволяет уменьшить время принятия правильных управленческих решений оператором, что положительно сказывается на эффективности работы производственной линии и качестве вулканизации.

2. Предложены эффективные алгоритмы выбора и коррекции скорости линии вулканизации резиновой изоляции кабельно-проводниковой продукции в зависимости от измеряемых параметров процесса, что обеспечивает заданные требования по вулканизации изделия.

3. Разработана методика получения вулканизационных характеристик из результатов натурального эксперимента, которая позволила описать вулканизационные свойства резиновой смеси со средней величиной среднеквадратичного отклонения 0,005%, что позволило значительно повысить точность описания кинетических свойств резины.

4. Проведены и статистически обработаны экспериментальные исследования вулканизационных и теплофизических характеристик различных резиновых смесей, что позволило систематизировать и значительно расширить имеющуюся базу данных СППР.

5. Разработана математическая модель тепломассопереноса при вулканизации изоляции кабельной продукции, позволяющая анализировать процесс вулканизации изоляции, и может быть использована при обосновании выбора оператором рациональных режимов для новых маркоразмеров или новых резиновых смесей. Модель используется для исследования закономерностей

процесса тепломассопереноса и обоснованного выбора основных параметров, влияющих на степень завершенности вулканизации, что снижает уровень неопределенности при работе оператора производственной линии.

6. Результаты работы апробированы в производственных условиях, на что получена справка об использовании результатов диссертации ООО «Камский Кабель». Апробация показала, что использование СППР позволяет снизить время принятия решений оператором в стандартных ситуациях в среднем на 5-10% и сократить время выбора рациональных режимов для новых изделий с нескольких часов до нескольких минут.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

ДМА Динамический механический анализ;

ДСК Дифференциальная сканирующая калориметрия

СППР – Система поддержки принятия решения

СЗПВ Степень завершенности процесса вулканизации

ТГА Термогравиметрический анализ

ТПЖ Токопроводящая жила

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Кузнецов, А.С. О применении системного подхода при анализе процессов структурирования эластомерных систем // Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности: сб. тр. Межд. Науч.-практ. Конф. – Смоленск, 2015. – С.102-104.
2. Кузнецов, А. С. Математические модели реограмм состояния в программах Table Curve 2d/3d как основа интеллектуальной системы управления процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов / А. С. Кузнецов, В. Ф. Корнюшко // Программные продукты и системы. – 2017. – № 4. – С. 770-777.
3. Маслов, А. А. Разработка системы принятия решений для определения оптимального режима процесса неизотермической вулканизации : специальность 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Маслов Александр Александрович. – Воронеж, 2019. – 175 с.
4. Mumali F., (2022). Artificial neural network-based decision support systems in manufacturing processes: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering* 165: 107964.
5. Milani, G. Genetic algorithm for the n of rubber insulated high voltage power cables production lines / G. Milani, F. Milani // *Computers and Chemical Engineering*. – 2008. – Vol. 32. – P. 3198-3212.
6. Митрохин, А. А. Модели прогнозирования качества продукции потенциально опасного процесса вулканизации автомобильных шин / А. А. Митрохин, К. Ю. Гусев, В. Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – Т. 13, № 3. – С. 28-33.
7. Математическое моделирование и разработка системы корректировки режимов термообработки прессовых валов для формирования структуры древесно-цементного композита / Ю. Р. Осипов, Д. А. Богданов, Н. Э. Дымов, С.

Ю. Осипов // Актуальные проблемы развития лесного комплекса : Материалы Международной научно-технической конференции, Вологда, 05 декабря 2017 года / Вологодский государственный университет; Ответственный редактор С.М. Хамитова. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2018. – С. 107-110.

8. Осипов, С. Ю. Система автоматизированного проектирования непрерывных процессов термообработки материалов с полимерным покрытием/ Ю.Р. Осипов, О.В. Левыкина // Пенитенциарная наука. – 2009. – №7. – С. 63-66.

9. Павлов, В. В. Разработка методики оптимизации тепловых режимов вулканизации гуммировочных покрытий / В. В. Павлов, Ю. Р. Осипов, С. Ю. Осипов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2008. – № 3(18). – С. 104-111.

10. Павлов, В. В. Методы оптимизации и прогнозирования тепловых режимов вулканизации гуммированных изделий / В. В. Павлов, С. Ю. Осипов, Ю. Р. Осипов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2009. – № 1(20). – С. 109-112.

11. Аваев, А. А. Двухмерная математическая модель внутреннего теплопереноса в процессе вулканизации эластомерного покрытия. Движение зоны активного теплового воздействия вдоль внешней поверхности покрытия / А. А. Аваев // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2009. – № 1(20). – С. 106-109

12. Иванов, С. Д. Математическое моделирование технологического процесса вулканизации / С. Д. Иванов, Г. Г. Гоппе, Д. С. Киргин // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2012. – № 9(68). – С. 219-224.

13. Ищенко, В. А. Особенности расчетов режимов вулканизации пневматических шин с учетом трехмерности конструкции // Системные технологии: региональный межвуз. Сб. науч. Трудов. – Днепропетровск, – 2008. – № 2 (55). – С. 147 – 158

14. Ищенко, В. А. Расчет температурных полей при вулканизации эластомерных изделий / В. А. Ищенко, М. В. Шаптала // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2005. – № 9. – С. 174-176.

15. Дятлов, И. Я. Описание вулканизационных кривых при помощи трехпараметрического уравнения / И. Я. Дятлов, Н. М. Труфанова // Электротехника. – 2020. – № 11. – С. 34-38.

16. Осипов, С. Ю. Система автоматизированного проектирования непрерывных процессов термообработки материалов с полимерным покрытием/ Ю.Р. Осипов, О.В. Левыкина // Пенитенциарная наука. – 2009. – №7. – С. 63-66.

17. Автоматическая корректировка тепловых режимов термообработки покрытий гуммированных объектов / С. Ю. Осипов, Н. В. Потапов, Ю. Р. Осипов, А. Ю. Скоробогатова // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2012. – № 3-1(40). – С. 10-14.

18. Анализ методов и устройств для оптимизации, контроля параметров, корректировки режимов и управления процессом вулканизации / С. Ю. Осипов, А. Ю. Скоробогатова, Ю. Р. Осипов, Н. В. Потапов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2010. – № 2(25). – С. 101-105.

19. Тепломассоперенос при сушке клеевого покрытия / С. Ю. Осипов, Н. А. Бормосов, Ю. Р. Осипов [и др.] // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования : Материалы девятой Международной научно-технической конференции, Вологда, 18–19 марта 2014 года. – Вологда: Федеральное государственного бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Вологодский государственный университет», 2014. – С. 142-145.

20. Computer simulation of cure process of an axisymmetric rubber article reinforced by metal plates using extended ABAQUS code / M. Ghoreishy, M. Rafei, G.

Naderi, G. Bakhshandeh, M. Nasiri. // *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*. – 2010. – Vol. 23, No. 2. – P. 121-131.

21. Ghoreishy M. Optimization of the vulcanization process of a thick rubber article using an advanced computer simulation technique / M.Rafei, G. Naderi // *Rubber Chemistry and Technology*. – 2012. – Vol. 85. – P. 576-589.

22. Ghoreishy, M. Three-dimensional finite element modeling of rubber curing process / M.Ghoreishy, G. Naderi // *Journal of Elastomers & Plastics*. – 2005. – Vol. 37, No. 1. – P. 37-53.

23. Ghoreishy, M. Advances in the simulation of the tire curing process / M. Ghoreishy, M. Rafei, G. Naderi // *Tire Technology International Annual Review*. – 2012. – P. 66-70.

24. Ghoreishy, M. A state-of-the-art review on the mathematical modeling and computer simulation of rubber vulcanization process // *Iranian Polymer Journal*. – 2016. – Vol. 25. – P. 89-109.

25. Ghoreishy, M. Computer Simulation of Cure Process of an Axisymmetric Rubber Article Reinforced by Metal Plates Using Extended ABAQUS Code / M. Ghoreishy, M. Rafei, G. Naderi, G.R. Bakhshandeh, M. Nasiri. // *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*. – 2013. – Vol. 23, No. 2. – P. 121-131.

26. Ghoreyshi, M. A Numerical Study on the Non-linear Finite Element Analysis of a Tire under Axisymmetric Loading // *Iranian Polymer Journal*. – 2002. – Vol. 11, No. 5. – P. 325-332.

27. Ghoreyshi, M. Three dimensional finite element 144haracte of truck type curing process in mould / M. Ghoreyshi, G. Naderi // *Iranian Polymer Journal*. – 2005. – Vol. 14. – P. 735-743.

28. Rafei, M. Development of an advanced computer simulation technique for the modeling of rubber curing process / M. Rafei, M. Ghoreishy, G. Naderi // *Computational Materials Science*. – 2009. – Vol. 47. – P. 539-547.

29. Kamal, M.R. Kinetics and thermal characterisation of thermoset cure / M.R. Kamal, S. Sourour // *Polymer Engineering and Science*. – 1973. – Vol. 13. – P. 59-64.
30. Kamal, M.R. The behavior of thermosetting compounds in injection molding cavities / M.R. Kamal, M. Ryan // *Polymer Engineering and Science*– 1980. – Vol. 20. – P. 859-867.
31. Milani, G. Iterative robust numerical procedure for the determination of kinetic constants in Han's model for NR cured with sulphur / G. Milani, F. Milani // *The Journal of Mathematical Chemistry*. – 2015. – Vol. 53. – P. 1363-1379.
32. Milani, G. Curing degree prediction for S-TBBS-DPG natural rubber by means of a simple numerical model accounting for reversion and linear interaction / G. Milani, F. Milani // *Polymer Testing*. – 2016. – Vol. 52. – P. 9-23.
33. Mechanistic modeling of reversion phenomenon in sulphur cured natural rubber vulcanization kinetics / G. Milani, F. Leroy, F.D. Milani, R. Deterre // *Polymer Testing*. – 2013. – Vol. 32. – P. 1052-1063.
34. Mohammad, R.E. A three dimensional simulation of a rubber curing process considering variable order of reaction / R.E. Mohammad, A. Morteza, M. Mohammad // *Applied Mathematical Modelling*. – 2016. – Vol. 40. – P. 8592-8604.
35. Иванова, Е. В. Численное моделирование комплекса теплофизических и термохимических процессов при вулканизации кабельных изделий / Е. В. Иванова, П. А. Стрижак // *Тепловые процессы в технике*. – 2012. – Т. 4, № 4. – С. 187-192
36. Иванова Е.В., Кузнецов Г.В. Численное моделирование температурных полей цилиндрических изделий при вулканизации / Е.В. Иванова, Г.В. Кузнецов // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2011. – № 7. – С. 10-11.
37. Ivanova, E. V. Effect of errors of determination of thermochemical and thermophysical characteristics of insulating materials on integral process parameters of

their polymerization / E. V. Ivanova, G. V. Kuznetsov, P. A. Strizhak // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2015. – Vol. 51, No. 3. – P. 164-170.

38. Ivanova, E. V. Mathematical modeling of physico-chemical processes in the polymerization of multicore cable products / E. V. Ivanova, G. V. Kuznetsov, P. A. Strizhak // *EPJ Web of Conferences*, Tomsk, 16–18 October 2014. – Tomsk, 2014. – P. 01024.

39. Молчанов, В. И. Моделирование кинетики вулканизации полидиенов / В. И. Молчанов, О. В. Карманова, С. Г. Тихомиров // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. – 2013. – № 1(55). – С. 142-145.

40. Моделирование кинетики неизотермической вулканизации массивных резиновых изделий / В. И. Молчанов, О. В. Карманова, С. Г. Тихомиров [и др.] // *Труды БГТУ. №4. Химия, технология органических веществ и биотехнология*. – 2014. – № 4(168). – С. 100-104.

41. Молчанов, В. И. Разработка математической модели вулканизации двухфазных полимерных систем / В. И. Молчанов, О. В. Карманова, Д. О. Паршута // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. – 2013. – № 1(55). – С. 127-130.

42. Ceramic/natural rubber composites: influence types of rubber and ceramic materials on curing, mechanical, morphological, and dielectric properties / S. Salaeh, N. Muensit, P. Bomlai, C. Nakason // *Journal of Materials Science*. – 2011. – Vol. 46. – P. 1723-1731.

43. Likozar, B. Cross-Linking of Polymers: Kinetics and Transport Phenomena / B. Likozar, M. Krajnc // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2011. – Vol. 50, No. 3. – P. 1558-1570.

44. Likozar, B. A study of heat transfer during molding of elastomers / B. Likozar, M. Krajnc // *Chemical Engineering Science*. – 2008. – Vol. 63, No. 12. – P. 3181-3192.

45. An experimental and theoretical study of heat conduction and vulcanization of rubber compounds in molds / D. Kong, J.L. White, F.C. Weissert, N. Nakajima // *Rubber Chemistry and Technology*. – 1987. – Vol. 60. – P. 140-158.

46. Численный алгоритм расчета температурных полей пневматических шин в процессе вулканизации / С. Г. Тихомиров, Ю. В. Пятаков, О. В. Карманова, В. И. Молчанов // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. – 2015. – № 2(64). – С. 158-164.

47. Leonov, A. P. Providing a minimum defectiveness of inter-turn insulation at the manufacturing stage and during the exploitation / A. P. Leonov, A. Supueva // *Resource-Efficient Technologies*. – 2022. – No. 1. – P. 1-9

48. Тепловой расчет кристаллизатора МНЛЗ с щелевыми каналами водяного охлаждения / И. М. Ячиков, М. Н. Самодурова, Н. А. Феоктистов [и др.] // *Металлург*. – 2022. – № 10. – С. 14-21

49. Кузнецов, Г. В. Математическое моделирование температурных полей в процессе вулканизации типичных кабельных изделий / Г. В. Кузнецов, Е. В. Иванова // *Известия Томского политехнического университета*. – 2010. – Т. 316, № 4. – С. 38-41.

50. Мамбетова, Е.А., Труфанова Н.М. Математическое моделирование температурных полей и степени вулканизации в процессе вулканизации типичных кабельных изделий/ Е.А. Мамбетова, Н.М.Труфанова // *Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2012. – № 6. – С. 152-158.

51. Труфанова, Н. М. Математическая модель и численный анализ процесса вулканизации резиновой изоляции кабелей / Н. М. Труфанова, Д. П. Пасынков // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2014. – № 5. – С. 304-307.

52. Kosar, V., Kraljević Z., Radović M. Modeliranje procesa umreženja izolacije izoliranih vodiča energijskih kabela / V. Kosar, Z. Kraljević, M. Radović // *Kemija u Industriji-Journal of Chemists and Chemical Engineers*. – 2017. – Vol. 66, No. 11. – P. 591-599.

53. Стародубцев, А. А. Система поддержки принятия решений / А. А. Стародубцев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – Т. 2, № 12. – С. 99-101.
54. Keen, P. Decision support systems : a research perspective. Cambridge, Massachusetts : Center for Information Systems Research, Alfred P. Sloan School of Management.
55. Sprague, R;(1980). "A Framework for the Development of Decision Support Systems." MIS Quarterly. Vol. 4, No. 4, pp. 1–25.
56. Holsapple, C.W., and A. B. Whinston. (1996). Decision Support Systems: A Knowledge-Based Approach. St. Paul: West Publishing. ISBN 0-324-03578-0
57. Hackathorn, R. D., P. G. W. Keen. Organizational Strategies for Personal Computing in Decision Support Systems. / R. D. Hackathorn, P. G. W. Keen. // MIS Quarterly. – 1981. – Vol. 5, No. 3. – P.21-27.
58. Кузнецов, М. А. Современная классификация систем поддержки принятия решений / М. А. Кузнецов, С. С. Пономарев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2009. – № 3(7). – С. 52-58.
59. Карташов, Г. П. Классификация систем поддержки принятия решений для использования в системе управления событиями и информацией о безопасности / Г. П. Карташов, Е. К. Корбин. // Молодой ученый. — 2023. — № 37 (484). — С. 9-11.
60. Булавин, Д. А. Структурно-параметрическая идентификация и генетические алгоритмы как аппарат проектирования системы поддержки принятия решений / Д. А. Булавин, О. В. Калиниченко, А. С. Рогозянов // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2006. – № 136. – С. 81-87.
61. Кравченко, Т. К. Экспертная система поддержки принятия решений / Т. К. Кравченко // Открытое образование. – 2010. – № 6. – С. 147-156.
62. Системы поддержки принятия решений в составе интеграционных механизмов финансового рынка ЕАЭС в контексте устойчивого развития / Н. С.

Воронова, Е. А. Яковлева, Э. Э. Шарич, Д. Д. Яковлева // Экономика, предпринимательство и право. – 2021. – Т. 11, № 12. – С. 3105-3120.

63. Малых, В. Л. Системы поддержки принятия решений в медицине / В. Л. Малых // Программные системы: теория и приложения. – 2019. – Т. 10, № 2(41). – С. 155-184.

64. Мартыненко, Ю. В. Разработка СППР на основе статистических методов для промышленного предприятия в условиях цифрового производства / Ю. В. Мартыненко // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. – 2019. – Т. 12, № 5. – С. 33-43.

65. ГОСТ 2068-61 Резина электрических кабелей, проводов и шнуров. – М. : Издательство стандартов, 1967. – 10 с.

66. Research on Vulcanization Process Simulation of Butyl Rubber Based on A New Characterization Model of Curing Degree / J. Wu, B. Su, Q. Liu, Y. Wang // Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology. – 2014. – Vol. 30, No. 4. – P. 237-247.

67. Modeling of truck tire curing process by an experimental and numerical method / B. Su, J. Wu, Z. Cui, Y. Wang // Iranian Polymer Journal. – 2015. – Vol. 24. – P. 583-593.

68. Research on Vulcanization Process Simulation of Butyl Rubber Based on A New Characterization Model of Curing Degree / J. Wu, B. Su, Q. Liu, Y. Wang // Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology. – 2014. – Vol. 30, No. 4. – P. 237-247.

69. Marzocca, A. Finite element analysis of cure in a rubber cylinder // Polymer. – 1991. – Vol. 32. – P. 1456-1460.

70. Dynamic simulation of the tire curing process / I.S. Han, C.B. Chung, J.H. Kim, S.J. Kim, H.C. Chung, C.T. Cho, S.C. Oh // Tire Science and Technology. – 1996. – Vol. 24. – P. 50-76.

71. Shi, F. 3D numerical simulation of filling and curing processes in non-isothermal RTM process cycle / F. Shi, X. Dong // *Finite Elements in Analysis and Design*. – 2011. – Vol. 47, No.7. – P. 764-770.

72. Abhilash, P.M. Simulation of curing of a slab of rubber/ K.Kannan, B. Varkey. // *Materials Science and Engineering*. – 2010. – Vol. 168. – P. 237-241.

73. Численный алгоритм расчета температурных полей пневматических шин в процессе вулканизации / С. Г. Тихомиров, Ю. В. Пятаков, О. В. Карманова, В. И. Молчанов // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. – 2015. – № 2(64). – С. 158-164.

74. Tong, J. Finite element analysis of tire curing process / J. Tong, X.Yan // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2003. – Vol. 22. – P. 983-1002.

75. Yan, X. A numerical modeling of dynamic curing process of tire by finite element // *Polymer Journal*. – 2007. – Vol. 39. – P. 1001-1010.

76. Hang, J. Rubber Curing Process Simulation Based on Parabola Model / J. Hang, W. Tang // *Journal of Wuhan university of technology-materials science edition*. – 2013. – Vol. 28, No. 1. – P. 150-156.

77. Kosar, V., Kraljević Z., Radović M. Modeliranje procesa umreženja izolacije izoliranih vodiča energijskih kabela / V. Kosar, Z. Kraljević, M. Radović // *Kemija u Industriji-Journal of Chemists and Chemical Engineers*. – 2017. – Vol. 66, No. 11. – P. 591-599.

78. Landgraf, R. Modelling and simulation of acrylic bone cement injection and curing within the framework of vertebroplasty / R. Landgraf, J. Ihlemann, S. Kolmeder // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. – 2015. – Vol. 95, No. 12. – P. 1530-1547.

79. Zhou, S. Effect of hybrid carbon fillers on the electrical and morphological properties of polystyrene nanocomposites in microinjection molding / S. Zhou, A. N. Hrymak, M. R. Kamal // *Nanomaterials*. – 2018. – Vol. 25, No. 10. – P. 5711-5730

80. Осипов, С. Ю. Эксплуатационные и качественные характеристики эластомерных покрытий гуммированных объектов / С. Ю. Осипов, Ю. Р. Осипов, О. А. Панфилова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 1. – С. 38-42.
81. Tang , W. Rubber curing process simulation based on parabola model // Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition. – 2013. – Vol. 28. – P. 150-156.
82. Лукомская, А.И. Расчеты и прогнозирование режимов вулканизации резиновых изделий / А.И.Лукомская, П.Ф.Баденков, Л.М.Кеперша. – М.: Наука, 1995. – 351 с.
83. Schuppner, V. The effects of operational parameters in hot-air vulcanization / V. Schuppner, S. Brockhaus, C. Penner // International Polymer Science and Technology. – 2015. – Vol. 43, No. 7. – P. 1-6.
84. ГОСТ Р 54547-2011. Смеси резиновые. Определение вулканизационных характеристик с использованием безроторных реометров. – М.: Стандартинформ, 2013. – 19 с
85. Harada, M. Analytical methods for vulcanized rubbers // International Polymer Science and Technology. – 2015. – Vol. 88. – P. 192-197.
86. Bromo butyl rubber cross-linked by bismaleimide resins, curing kinetics and properties / P. Dhanya, S. Ratheesh, S.B. Singh, R.Nair // Journal of Polymer Materials. – 2016. – Vol. 33. – P. 723-736.
87. Ganapathi, A.S. Simulation of bleeder flow and curing of thick composites with pressure and temperature dependent properties / A.S. Ganapathi, C. J. Sunil, C. Zhong // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2013. – Vol. 32. – P. 64-82
88. Study on phenomenological curing model of epoxy resin for prediction of degree of cure / Z. Liu, J. Xiao, S. Bai, W. Zhang // Thermal Analysis Calorimetry. – 2012. – Vol. 109. – P. 1555-1561.
89. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева // Изд. 2-е, стереотип. М.: «Энергия», 1977. — 344 с.

90. Hands, D. The effect of biaxial orientation on the thermal conductivity of vulcanized and unvulcanized rubber // *Rubber Chemistry and Technology*. – 1980. – Vol. 53. – P. 80-87.
91. Hands, D. The thermal transport properties of polymers // *Rubber Chemistry and Technology*. – 1977. – Vol. 50. – P. 480-522.
92. Hands, D. Thermal diffusivity and conductivity of natural rubber compounds / D. Hands, F. Horsfall // *Rubber Chemistry and Technology*. – 1977. – Vol. 50. – P. 253-265.
93. Sircar, A.K. Thermal conductivity of elastomer vulcanizates by differential scanning calorimetry / A.K. Sircar, J.L. Wells // *Rubber Chemistry and Technology*. – 1982. – Vol. 55. – P. 191-207.
94. Influence of peroxide curing systems on the performance of natural rubber-based magnetic composites / J. Kruželák, R. Sýkora, R. Dosoudil, I. Hudec // *Composite Interfaces*. – 2015. – Vol. 22, No. 6. – P. 473-488.
95. Тепломассоперенос при сушке клеевого покрытия / С. Ю. Осипов, Н. А. Бормосов, Ю. Р. Осипов [и др.] // *Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования : Материалы девятой Международной научно-технической конференции, Вологда, 18–19 марта 2014 года*. – Вологда: Федеральное государственного бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Вологодский государственный университет», 2014. – С. 142-145.
96. Дятлов, И. Я. Исследование процесса вулканизации резиновой смеси при помощи ротационного реометра / И. Я. Дятлов, Н. М. Труфанова // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2018. – № 7. – С. 91-94.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Макрос расчета СЗПВ по кривой нагрева.

```
Public Sub r()
```

```
Dim T(0 To 1000), alp(0 To 1000), ti(0 To 1000) As Single
```

```
Dim i As Integer
```

```
' сбор данных по температуре от времени
```

```
While Cells(i + 6, 2) > 0
```

```
ti(i) = Cells(i + 6, 1) ' время
```

```
T(i) = Cells(i + 6, 2) ' температура
```

```
N = i
```

```
i = i + 1
```

```
Wend
```

```
alp(0) = 0
```

```
For i = 1 To N
```

```
If T(i) < 140 Then
```

```
alp(i) = 0.0000001
```

```
End If
```

```
If (190 > Round(T(i), 0)) And (Round(T(i), 0) >= 140) Then
```

```
a1 = a(T(i))
```

```
b1 = b(T(i))
```

```
c1 = c(T(i))
```

```
alp(i) = a1 / (1 + (((ti(i) - ti(i - 1)) + tit(Round(T(i), 0), alp(i - 1), a1, b1, c1)) / b1) ^ c1)
```

```
End If
```

```
If (Round(T(i), 0) >= 190 Then
```

a1 = a(190)

b1 = b(190)

c1 = c(190)

alp(i) = a1 / (1 + (((ti(i) - ti(i - 1)) + tit(Round(T(i), 0), alp(i - 1), a1, b1, c1)) / b1)  
^ c1)

End If

Cells(i + 6, 3) = alp(i)

Cells(i + 6, 4) = ti(i) / 60

Cells(1, 6) = tit(170, 0.66, a(170), b(170), c(170))

Next i

End Sub

Public Function tit(T, alp, a, b, c)

tit = b \* (a / (alp + 0.0000000001) - 1) ^ (1 / c)

End Function

Public Function c(T)

Dim cf(0 To 5) As Single

cf(0) = -1

cf(1) = -1.834 ' 150

cf(2) = -1.824 ' 160

cf(3) = -1.854 ' 170

cf(4) = -2.084 ' 180

cf(5) = -2.564 ' 190

tt = T

Select Case Round(T, 0)

Case Is < 139

c = 0

Case 140 To 150

j = 1

Tmin = 140

Tmax = 150

Case 151 To 160

j = 2

Tmin = 151

Tmax = 160

Case 161 To 170

j = 3

Tmin = 161

Tmax = 170

Case 171 To 180

j = 4

Tmin = 171

Tmax = 180

Case 181 To 200

j = 5

Tmin = 181

Tmax = 190

End Select

If j > 0 Then

$c = (cf(j) - cf(j - 1)) / (Tmax - Tmin) * (tt - Tmin) + cf(j - 1)$

End If

End Function

Public Function b(T)

Dim bf(0 To 5) As Single

bf(0) = 328.78

$$\text{bf}(1) = 227.525$$

$$\text{bf}(2) = 177.125$$

$$\text{bf}(3) = 115$$

$$\text{bf}(4) = 87.925$$

$$\text{bf}(5) = 71.225$$

$$\text{tt} = T$$

Select Case Round(T, 0)

Case Is < 139

$$b = 0$$

Case 140 To 150

$$j = 1$$

$$T_{\min} = 140$$

$$T_{\max} = 150$$

Case 151 To 160

$$j = 2$$

$$T_{\min} = 151$$

$$T_{\max} = 160$$

Case 161 To 170

$$j = 3$$

$$T_{\min} = 161$$

$$T_{\max} = 170$$

Case 171 To 180

$$j = 4$$

$$T_{\min} = 171$$

$$T_{\max} = 180$$

Case 181 To 190

$$j = 5$$

$$T_{\min} = 181$$

$$T_{\max} = 190$$

```
End Select
If j > 0 Then
b = (bf(j) - bf(j - 1)) / (Tmax - Tmin) * (tt - Tmin) + bf(j - 1)
End If
End Function
Public Function a(T)
Dim af(0 To 5) As Single
af(0) = 1.01
af(1) = 0.994
af(2) = 1.073
af(3) = 1.06
af(4) = 1.031
af(5) = 1.091
tt = T
Select Case Round(T, 0)
Case Is < 139
a = 0
Case 140 To 150
j = 1
Tmin = 140
Tmax = 150
Case 151 To 160
j = 2
Tmin = 151
Tmax = 160
Case 161 To 170
j = 3
Tmin = 161
Tmax = 170
```

Case 171 To 180

j = 4

Tmin = 171

Tmax = 180

Case 181 To 190

j = 5

Tmin = 181

Tmax = 190

End Select

If j > 0 Then

$a = (af(j) - af(j - 1)) / (Tmax - Tmin) * (tt - Tmin) + af(j - 1)$

End If

End Function

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2****Макрос расчета кинетических характеристик.**

```
Public Sub RR()
```

```
Const N = 3000
```

```
Dim r(0 To N), f(0 To N), Mt(0 To N), tt(0 To N), t(0 To N), max, min As Single
```

```
Dim Q(0 To 10), ci(0 To 10), ai(0 To 10), bi(0 To 10) As Single
```

```
'вносим данные с 3 строки 1 2 столбца
```

```
For i = 0 To N
```

```
If Cells(4 + i, 1) > 0 Then
```

```
t(i) = Cells(4 + i, 2)
```

```
Mt(i) = Cells(4 + i, 1)
```

```
m = i
```

```
Else
```

```
i = N
```

```
End If
```

```
Next i
```

```
' max min значения
```

```
min = Mt(0)
```

```
max = Mt(0)
```

```
For i = 1 To m
```

```
If Mt(i) < min Then
```

```
min = Mt(i)
```

```
imin = i
```

```
End If
```

```
If Mt(i) > max Then
```

```
max = Mt(i)
```

```
imax = i
```

```
End If
Next i
Cells(1, 3) = min
Cells(1, 4) = imin + 3
Cells(2, 3) = max
Cells(2, 4) = imax + 3
' всего точек от минимума

Ntf = Abs(imax - imin) '
'сдвиг 0 от минимального момента

f(0) = 0
tt(0) = 0
For i = 1 To (Ntf)
f(i) = Abs(Mt(i + imin) - min) / (max - min)
tt(i) = t(i + imin) - t(imin)
Next i

For i = 0 To (Ntf)
Cells(4 + i, 3) = f(i)
Cells(4 + i, 4) = tt(i)
Next i

' определение а б с
f1 = 0.5
For i = 0 To Ntf
  If f(i) <= f1 Then
    t1 = tt(i)
    i1 = i
```

```

Else: i = Ntf
End If
Next i
b = (f1 - f(i1)) / (f(i1 + 1) - f(i1)) * (tt(i1 + 1) - tt(i1)) + tt(i1)
a = 1
qmin = 0.01
qq = 0.1
qa = 0
qc = 1
qb = 0.5
iter = 0
While (Abs((qc - qb) / qc) >= 0.01) = True
iter = iter + 1
If iter > 1000 Then
Stop
End If
c = Log(a / f(4) - 1) / Log(tt(4) / b)
c1 = -6
c2 = -1
a1 = 1
a2 = 1.1
b1 = b - b / 10
b2 = b + b / 10
h = 0.001
a = a1
For i = 1 To Ntf
Qi0 = Qi0 + (f(i) - a / (1 + (tt(i) / b) ^ c)) ^ 2
Next i
a = a1 + h

```

```

Z = 1
While Abs(Qi - Qi0) / Qi0 <= 0.01
  Qi = 0
  For i = 1 To Ntf
    Qi = Qi + (f(i) - a / (1 + (tt(i) / b) ^ c)) ^ 2
  Next i
  If Qi <= Qi0 Then
    a = a + Z * h
  Else
    a = a - Z * h
  End If
  Qir = Qi0
  Qi0 = Qi
  Cells(3, 23) = "Qi"
  Cells(3, 22) = "a"
  Cells(4 + ait, 22) = a
  Cells(4 + ait, 23) = Qi
  Cells(4 + ait, 24) = (Qi - Qir) / Qir
  ait = ait + 1
  If ait > 100 Then Stop
Wend
Wend
kk = 1
qq = 0
For i = 1 To Ntf
  qq = qq + (f(i) - a / (1 + (tt(i) / b) ^ c)) ^ 2
Next i
uu = qq
End Sub

```

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ООО «КАМСКИЙ КАБЕЛЬ»  
 614030, г. Пермь, ул. Гайвинская,  
 105  
 Банковские реквизиты:  
 ИНН 5904184047  
 КПП 785050001  
 р/сч. 40702810349500033426  
 Волго-Вятский банк ПАО  
 "Сбербанк"  
 к/сч. 30101810900000000603  
 БИК 042202603

«УТВЕРЖДАЮ»  
 Генеральный директор  
 ООО «Камский кабель»  
 В.В. Пономарев  
 «02» / 10 2023 г.

## СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы И.Я. Дятлова «Математическое и алгоритмическое обеспечение системы поддержки принятия решений оператора линии непрерывной вулканизации кабельной продукции», выдвинутой на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Вопросы разработки моделей тепломассопереноса внутри вулканизационной трубы и вулканизации изоляции кабеля в диссертационной работе И.Я. Дятлова, связаны с общей проблемой управления процессом вулканизации при разработке новых конструкций кабелей и реализации технологии их изготовления на ООО «Камский кабель». Подходы, развиваемые в диссертации, реализованы при выполнении ФГАОУ ВО «Пермский национальный научный исследовательский политехнический университет» договора о научно-техническом сотрудничестве с ООО «Камский кабель» № А16-27-12187/2016/407 от 27.06.2016 г. По итогам исследований к использованию в ООО «Камский кабель» приняты:

1. Методики и результаты экспериментальных исследований вулканизационных характеристик изоляционных материалов на, ротационном реометре DHR-2.
2. Результаты исследования работы вулканизационной линии.
3. Рекомендации по улучшению качества продукта за счет предложенных рациональных технологических режимов и алгоритмов выбора режима.
4. Математическое и алгоритмическое обеспечение системы поддержки принятия решений оператора линии непрерывной вулканизации кабельной продукции.

Зам. Главного технолога  
 ООО «Камский кабель»



И.В. Буров