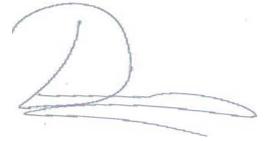


На правах рукописи



Дятлов Илья Яковлевич

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

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: **Труфанова Наталия Михайловна**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Ячиков Игорь Михайлович**
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Южно-Уральский
государственный университет (национальный
исследовательский университет)», профессор
кафедры «Информационно-измерительная
техника»

Леонов Андрей Петрович
кандидат технических наук, доцент,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет», доцент
отделения электроэнергетики и электротехники

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Воронежский государственный
университет инженерных технологий"
(г. Воронеж)

Защита диссертации состоится 22.02.2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д ПНИПУ.05.21, созданного на базе ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<http://www.pstu.ru>).

Автореферат разослан

«___» _____ 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. экон. наук, доцент



Алексеев Александр Олегович

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

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 (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., Корнюшко В.Ф., Маслова А.А., Шрейдер М.Ю., Mumali F., Milani G. 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., Осипова С.Ю., Павлова В.В., 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., Иванов С.Д., Ищенко В.А., Кузнецов А.С., Осипов С.Ю., Ghoreishy M.H.R., Rafei M., Kamal M.R., Milani G., Mohammad R.E. 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., Кузнецова А.С., Rafei M., Kamal M.R., Mohammad R.E. 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., Молчанова В.И., Осипова С.Ю., Subhan S., Likozar B., Kong 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., Ищенко В. А., Тихомирова С. Г., Леонова А.П., Маслова А.А., Ячикова И.М., Ghoreishy M.H.R., Naderi G, Rafei M., Mohammad R.E. и др. предложен широкий класс математических моделей тепломассопереноса.

Математические модели процесса вулканизации кабельной изоляции представлены в работах Ивановой Е.В., Кузнецова Г.В., Мамбетовой Е.А., Пасынкова Д.П. Kosar V. 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 СППР; 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 СППР 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 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 натурального 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 СППР 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, нестандартных 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 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 специальности 2.3.1).

2. Алгоритмы выбора и коррекции скорости линии непрерывной вулканизации изоляции кабеля при изменяющихся исходных данных (п.10 паспорта 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 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 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 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» (Пермь, 17.05. 2018); «Автоматизированные системы управления и информационные технологии» (Пермь, 3031.05.2019); «Автоматизированные системы управления и информационные технологии» (Пермь, 9–11.06.2020); «Автоматизированные системы управления и информационные технологии» (Пермь, 9–11.06.2021); XXI Зимней школе по механике сплошных сред (Пермь, 18–22.02. 2019); Актуальные проблемы прикладной математики и механики (Абрау-Дюрсо, 01–06.09.2020)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 статей в 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 страниц, в том числе 51 рисунок, 9 таблиц и 3 приложения.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблемы, определены цель и задачи исследования, дана общая характеристика диссертационной работы.

Первая глава содержит анализ состояния проблемы.

Описаны основные виды СППР, применяемые в промышленности, приведена их классификация, исследован вопрос применения СППР в кабельной промышленности.

Описаны основные типы резины, применяющейся в кабельной промышленности. Рассмотрены основные способы вулканизации. Представлены методы экспериментального исследования процесса вулканизации. Проведен анализ трудов отечественных и зарубежных ученых, посвященных математическому моделированию процессов тепломассопереноса и кинетики вулканизации, экспериментальным исследованиям процесса вулканизации, подходам к оптимизации и выбору оптимального режима в условиях изменения внешней среды.

Обнаружено, что большинство исследований посвящено процессу вулканизации крупногабаритных изделий, который существенно отличается от процесса непрерывной вулканизации кабельно-проводниковой продукции. При этом отсутствуют разработанные СППР, позволяющие существенно повысить эффективность процесса вулканизации за счет сокращения времени подбора его режимов как на уровне технолога, так и оператора линии непрерывной вулканизации кабельной продукции

Вторая глава посвящена разработке структурной модели СППР для управления линией непрерывной вулканизации изоляции кабеля. СППР базируется на математической модели процесса непрерывной вулканизации изоляции кабеля, базы данных и алгоритма коррекции режима.

В работе предложена структурная двухуровневая модель СППР (рисунок 1)

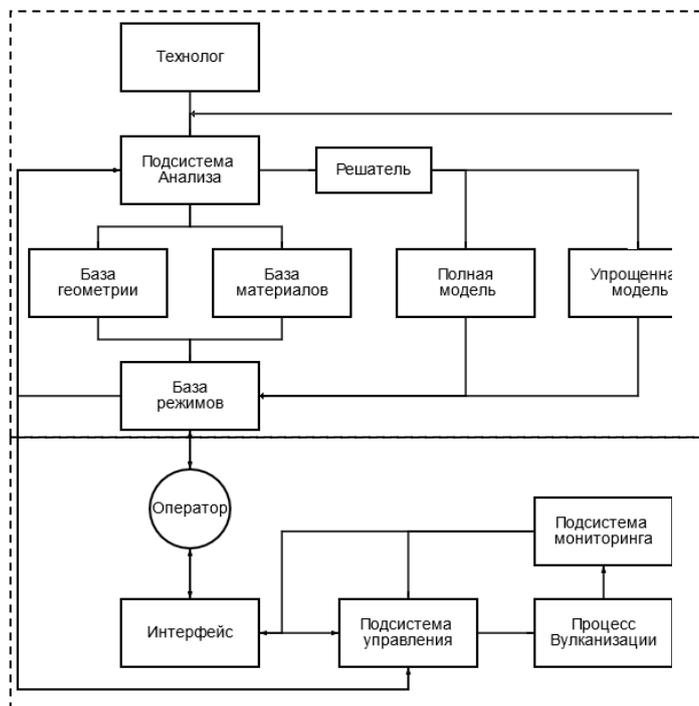


Рисунок 1 – Структурная модель СППР

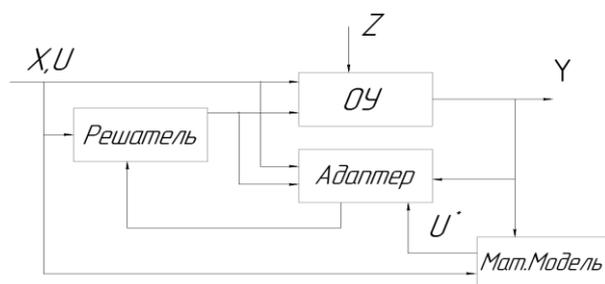


Рисунок 2 – Схема адаптивного управления

С СППР первого уровня взаимодействует технолог, отвечающий 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. База режимов пополняется.

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.

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 к управлению линией непрерывной вулканизации. 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 (λ), удельная теплоемкость (c), плотность (ρ)), 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 заготовки (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 (φ).

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

Управление процессом вулканизации осуществляется изменением величины линейной скорости перемещения кабеля, определяющей 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 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.).

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 заготовки и давления в вулканизационной трубе вследствие чего меняются выходные параметры Y .

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

Величина отклонения ΔY 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. 3).

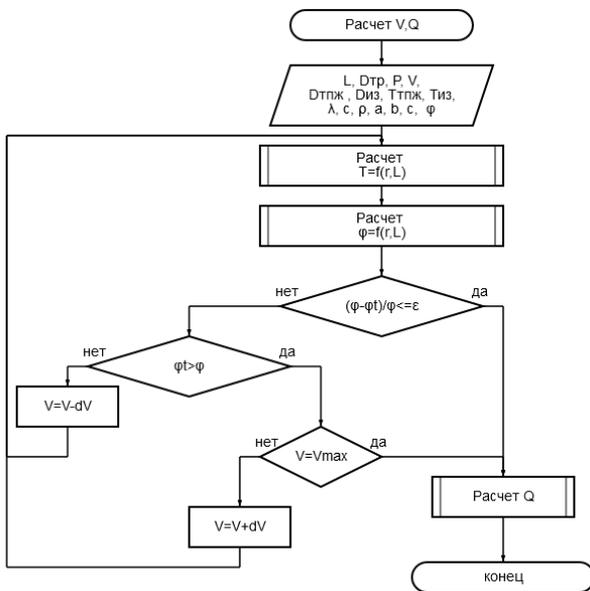


Рисунок 3 – Алгоритм расчета скорости линии

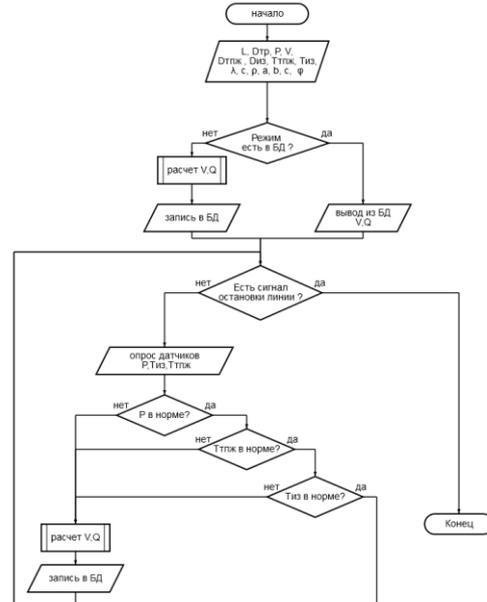


Рисунок 4 – Алгоритм коррекции скорости линии

Производится ввод данных: параметры линии, конструкция кабеля, его теплофизические и вулканизационные свойства, задается минимальная величина степени вулканизации и начальная скорость. Происходит расчет распределения температуры. 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.

Для выбора скорости предложен следующий алгоритм (рисунок 4).

Оператор вводит параметры: конструкцию 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 опрашиваются датчики температуры, диаметра 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 скорость для обширной номенклатуры кабельно-проводниковой продукции, скорректировать режим при изменении параметров.

В третьей главе представлено математическое обеспечение СППР технолога и оператора линии непрерывной вулканизации.

Математическое описание процессов теплопереноса 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.

При производстве кабелей со сшитой изоляцией металлическая жила поступает в формулирующий инструмент экструдера, где накладывается полимерный слой, далее – в вулканизационной трубе происходит процесс нагрева и сшивки полимерной изоляции. Температура резиновой смеси на выходе из экструдера обычно составляет 70-90°C. Внешняя поверхность трубы теплоизолирована.

В качестве основной модели рассмотрен кабель с медной ТПЖ диаметром 13 мм, резиновой изоляцией толщиной 2 мм, перемещающийся со скоростью 10 м/мин внутри вулканизационной трубы диаметром 100 мм, длиной 83м,.

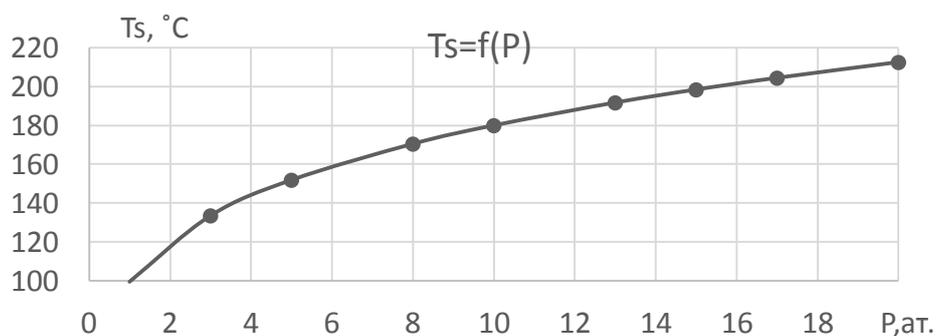


Рисунок 5 – Зависимость температуры пара от давления

Вулканизационная труба при производстве кабелей с резиновой изоляцией заполнена паро-водной средой под давлением 0,11-0,17 МПа, при этом температура насыщенного пара составляет порядка 180-210°C. Зависимость температуры пара от давления представлена на рисунке 5.

В работе сделаны следующие допущения: процесс установившийся, 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 (2).

$$\left\{ \begin{array}{l} c_6 \rho_6 \left(v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda_6 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \\ c_{из} \rho_{из} v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda_{из} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \\ c_{ТПЖ} \rho_{ТПЖ} v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda_{ТПЖ} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \\ \rho_6 \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \tau_{rr})}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \\ \rho_6 \left(v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \tau_{rz})}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho_6 v_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_6 v_z)}{\partial z} = 0 \\ \tau_{rz} = \mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right); \tau_{rr} = 2\mu \frac{\partial v_r}{\partial r}; \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z}; \\ \varphi = \frac{a(T)}{1 + \left(\frac{b(T)}{t} \right)^{c(T)}}; t = \frac{z}{V_z}; \end{array} \right.$$

где, ρ, C, λ – плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности; r, z – координата цилиндрической системы; v_z, v_r – компоненты вектора скорости; T – температура; $\tau_{rr}, \tau_{rz}, \tau_{zz}$ – тензор напряжений, μ – вязкость среды; g – ускорение свободного падения (m/c^2); φ – степень завершенности процесса вулканизации;

$a(T), b(T), c(T)$ – коэффициенты вулканизационных свойств; t – время.

Система уравнений замыкалась следующими граничными условиями (рисунок 6).

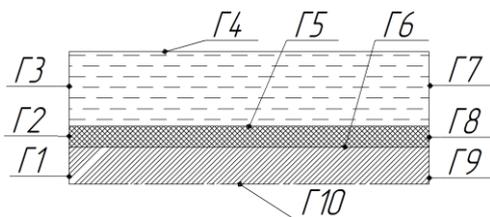


Рисунок 6 – Граничные условия

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 поверхности изоляции (Г5) реализовано условие непроникновения и прилипания. На входе и выходе трубы задаются давления пара (Г3, Г7), величины которых равны 0,109-0,11МПа, при этом температура пара на входе составляет 180°С. На поверхности вулканизационной трубы (Г4) задано условие адиабатического теплообмена, а также условие непроникновения и прилипания.

Для решения поставленной задачи использовался метод конечных объемов. Математическая модель непрерывного процесса вулканизации изоляции кабеля реализована в программном комплексе ANSYS Fluent. Сетка конечных объемов получена в ANSYS ICEM CFD.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию вулканизационных свойств резиновых смесей

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 рецептурами 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 экспериментов по определению зависимости степени вулканизации от времени при различных значениях температуры. Анализ вулканизационных свойств исследуемых резиновых смесей проводился на гибридном реометре ротационного типа Discovery HR-2.

Образец, помещался между рабочими поверхностями, которые нагревались до температуры 90-110°С и сжимался с осевым усилием 50Н, до толщины порядка 1 мм. Затем 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.

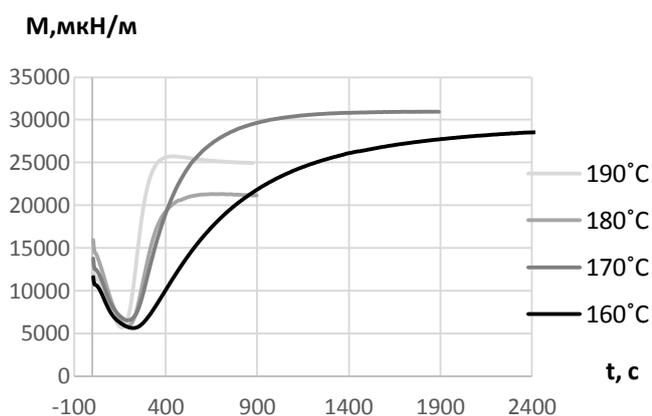


Рисунок 7 – Изменение крутящего момента во времени при разной температуре выдержки

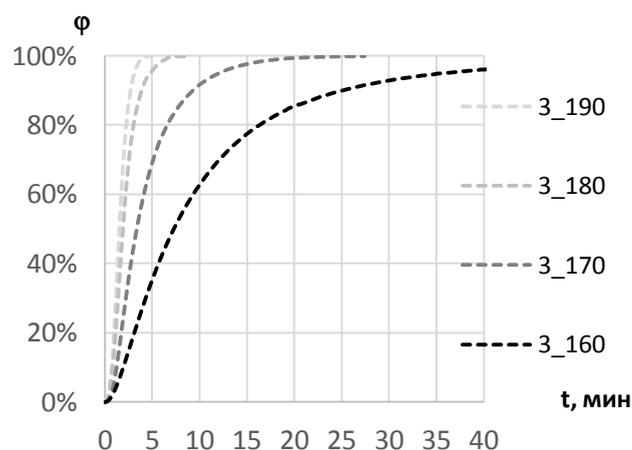


Рисунок 8 – Семейство кривых вулканизации при различных температурах выдержки

В ходе исследования фиксировалось изменение величины крутящего момента во времени до получения установившегося значения. В результате серии испытаний получено семейство кривых зависимости крутящего момента от времени для различных значений температуры (рисунок 7).

Видно, что температура образца существенно влияет на максимальную величину крутящего момента и на время его достижения. Начальный участок кривых, где происходит снижение величины крутящего момента, обусловлен молекулярной перестройкой в материале.

Современный подход в экспериментальном исследовании процесса сшивки основывается на оценке текущего M , максимального M_{\max} и минимального M_{\min} значений крутящего момента. Проведена серия экспериментов, для которых по средствам выражения (3) получено семейство кривых зависимости степени сшивки от времени при различных температурах (рисунок 8).

$$\varphi_{\vartheta} = \frac{M - M_{\min}}{M_{\max} - M_{\min}} \quad (3)$$

Из рисунка 8 видно, что чем выше температура образца, тем быстрее протекает процесс вулканизации, так величина степени вулканизации после 10 минут выдержки при 160°C составила 63%, после 5 минут при 170°C - 68%.

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

Пятая глава посвящена обработке результатов моделирования и апробации разработанной СППР в условиях реального производства.

В результате решения системы дифференциальных уравнений методом конечных объемов в пакете ANSYS FLUENT получено распределение температуры по длине и радиусу заготовки. Рассчитано распределение степени вулканизации по толщине изоляции и длине заготовки. Проведен анализ закономерностей теплового процесса и процесса вулканизации. Определено влияние технологических, теплофизических и кинетических параметров на процесс сшивки. Реализован алгоритм коррекции скорости линии вулканизации.

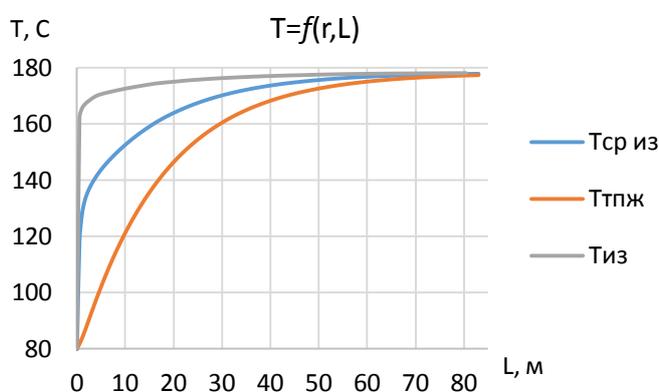


Рисунок 9 – Изменение температуры жилы, срединного слоя и поверхности изоляции по длине

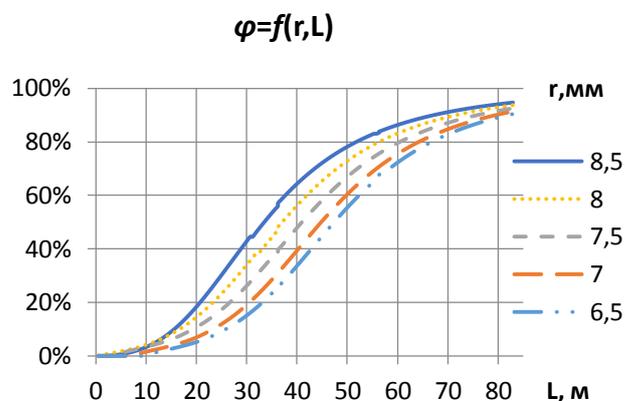


Рисунок 10 – Распределение степени вулканизации по радиусу и длине вулканизационной трубы

На рисунке 9 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 (рисунок 10).

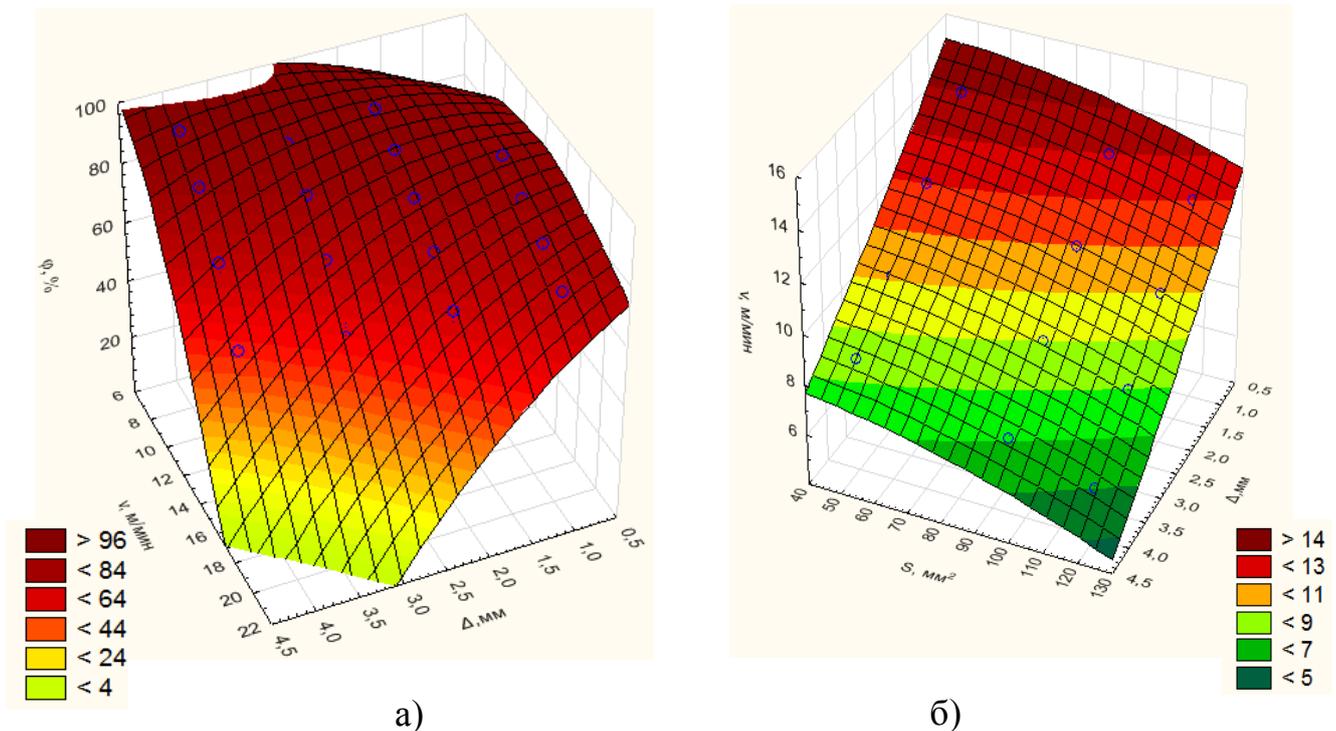


Рисунок 11– а) Зависимость степени завершенности от скорости и толщины изоляции при сечении ТПЖ 50 мм², б) зависимость скорости, при которой степень вулканизации составит 90%

Из рисунка 10. видно, что степень завершенности процесса существенно отличается для внутренних слоев изоляции. Так на длине 45м на поверхности изоляции степень сшивки достигает 70%, а на поверхности жилы лишь 45%.

На основе серий вычислений построены поверхности зависимости степени вулканизации от скорости и толщины изоляции для заданных сечений (рисунок.11а) исходя из графика, можно заметить, что при толщине изоляции 4 мм скорость должна быть не менее 9м/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%.

Проанализировав все зависимости, объединив данные скоростей при которых степень вулканизации составляет 90% можно прийти к следующим зависимостям скорости изолирования от толщины изоляции и поперечного сечения ТПЖ (рисунок 11-б), так при увеличении толщины на 1 мм скорость снижается на 2м/мин, а при изменении сечения в среднем на 1 м/мин.

Для полученных технологических поверхностей предложены регрессионные выражения (4-5)

$$\varphi = 2,3574 + 46,3283\Delta + 10,3421V - 3,9409\Delta^2 - 2,8327\Delta V - 0,3069V^2 \quad (4)$$

$$V = 15,9359 - 1,9565\Delta + 0,0118S + 0,0417\Delta^2 - 0,0023\Delta S - 0,0002S^2 \quad (5)$$

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

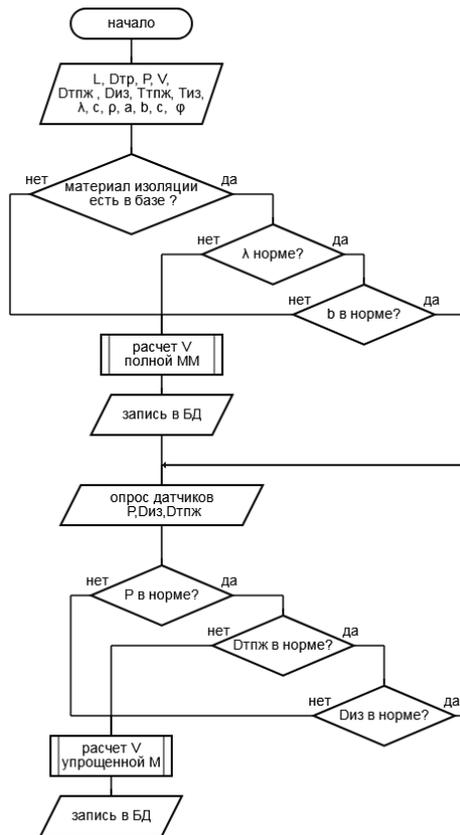


Рисунок 12 – Алгоритм коррекции скорости

Для коррекции скорости предложен следующий алгоритм (рисунок 12).

На первом этапе проверяется наличие марки материала в базе данных, поскольку значения величин теплофизических и кинетических характеристик материала данной марки могут изменяться, 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 скорости изолирования при помощи полной математической модели. Далее происходит опрос датчиков диаметра ТПЖ и изоляции, а также давления (температуры) пара. В случае удовлетворения условия выбирается режим из БД, в ином случае происходит перерасчет параметров технологического режима при помощи упрощенной модели, входящей в состав СППР, результаты заносятся в БД.

Таким образом, разработанное математическое и алгоритмическое обеспечение СППР позволяет анализировать процесс вулканизации и определять необходимые параметры режима вулканизации для новых конструкций кабеля и материалов изоляции с новыми свойствами или в случае перехода к нестандартным технологическим параметрам процесса.

Результаты работы использованы компанией ООО «Камский Кабель» при проведении опытно-промышленных испытаний и подтвердили работоспособность СППР при подборе режима работы линии вулканизации. Приведены оценочные (статистические) данные, подтверждающие сокращение в среднем времени выбора рациональных режимов на уровне технолога и оператора за счет применения разработанной СППР.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе анализа потребностей производства разработана новая концептуальная модель СППР оператора линии непрерывной вулканизации кабельной 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 линии вулканизации и качестве кабельной продукции.

2. Предложены эффективные алгоритмы выбора и коррекции скорости линии вулканизации кабельной 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 с 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. Модель используется для исследования закономерностей процесса тепломассопереноса и обоснованного выбора основных параметров, влияющих на степень завершенности вулканизации, что снижает уровень неопределенности при назначении режимов технологом и работе оператора линии вулканизации.

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 технологом для новых изделий с нескольких часов до нескольких минут.

IV. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

1. Исследование процесса вулканизации резиновой смеси при помощи ротационного реометра / И. Я. Дятлов, Н. М. Труфанова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 7. – С. 91–94.
2. Численное исследование процесса сшивки полиэтилена в вулканизационной трубе в среде азота / А. А. Корелин, И. Я. Дятлов, Н. М. Труфанова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 7. – С. 111–115.

3. Численный анализ процесса тепломассопереноса при силановой сшивке в водной ванне / Е. С. Гольцов, **И. Я. Дятлов**, Н. М. Труфанова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 7. – С. 91–94.
4. Математическая модель и численный анализ процесса пероксидной сшивки изоляции кабелей на среднее напряжение / А. А. Корелин, **И. Я. Дятлов**, Н. М. Труфанова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления – 2020. – № 35. – С. 119–132.
5. Моделирование процесса теплообмена при силановой сшивке в двухкомпонентной среде «вода–газ» с применением модели Volume of fluid / Е. С. Гольцов, **И. Я. Дятлов**, Н. М. Труфанова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 36. – С. 146–158.
6. 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**)
7. Управление производственной линией вулканизации изоляции силового кабеля / **И. Я. Дятлов**, Н. М. Труфанова // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences. – 2021. – № 3. – С. 81–94.
8. 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.
9. 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.

Подписано в печать 20.12.2023. Тираж 100 экз.
Усл. печ. л. 1.0 Формат 60×90/16. Заказ № 1860.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии издательства Пермского национального
исследовательского политехнического университета
614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел.: (342) 219-80-33