

МОСКОВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ТОНКИХ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

На правах рукописи

Кузнецов Андрей Сергеевич

**Алгоритмическо-информационное обеспечение системного
анализа автоматизированных химико-технологических
процессов структурирования многокомпонентных
эластомерных композитов**

05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации
(химическая технология)

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., профессор, В.Ф. Корнюшко

Москва 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ	12
1.1 Резина как сложный эластомерный многокомпонентный композиционный материал.	12
1.1.1 Аналитический обзор современных научных исследований по системному анализу и автоматизированному управлению сложными химико-технологическими процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов	14
1.2 Системный анализ управления жизненным циклом продукции из эластомерных композитов	21
1.3 Физико-химические модели сложного химико-технологического процесса структурирования эластомерных композитов на основе применения метода вибрационной реометрии	24
1.4 Выводы	38
Глава 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ	40
2.1 Разработка математических моделей реограмм состояния эластомерных композитов	40
2.1.1 Формализация дифференциальной кривой скорости процесса структурирования эластомерных композитов как функции распределения независимых случайных величин. Вычисление статистических моментов	45
2.2 Семантическая модель химико-технологических процессов структурирования эластомерных композитов	49
2.3 Разработка логико-информационной модели химико-технологических процессов структурирования эластомерных композитов	51
2.4 Выводы	56
Глава 3 РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ УПРАВЛЕНИЮ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ	57
3.1. Автоматизированные интеллектуальные системы управления химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов	57

3.2 Сравнительный анализ продукционных и когнитивных моделей управления химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов	61
3.3 Архитектура экспертных систем принятия решений по управлению химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов	64
3.4 Выводы	77
Глава 4 РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УЧЕБНО-НАУЧНОГО ТРЕНАЖЕРА ПО СИСТЕМНОМУ АНАЛИЗУ И УПРАВЛЕНИЮ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ	78
4.1 Анализ результатов математической обработки реограмм состояния эластомерных композитов	78
4.2 Процедура модификации осей координат при количественной интерпретации реограмм состояния эластомерных композитов	80
4.3 Анализ корреляционных соотношений при обработке реограмм состояния эластомерных композитов	91
4.4 Построение графических зависимостей основных количественных показателей процесса структурирования от рецептурно-технологических факторов	99
4.5 Выводы	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
ГЛОССАРИЙ ОСНОВНЫХ ТЕРМИНОВ И ПОНЯТИЙ	105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	106
ПРИЛОЖЕНИЯ	
Приложение 1. Вывод соотношений между параметрами моделей и характеристиками процесса структурирования	116
Приложение 2. Оценка влияния уровня содержания рецептурного фактора на основные характеристики процесса структурирования	118

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

В настоящее время большинство изделий из эластомерных материалов получают в процессе структурирования, которая представляет собой химический процесс пространственного сшивания и технологический процесс создания готового изделия из эластомеров [1, 3, 4].

Современное промышленное производство изделий из эластомеров – сложный многостадийный процесс, характеризующийся наличием нескольких стадий [4].

В общем виде система производства изделий из эластомеров представляет собой пример химико-технологической системы с последовательным соединением элементов [14, 15].

В работе рассматривается единая химико-технологическая система производства изделий из эластомеров, а также химико-технологические процессы смешения и структурирования многокомпонентных эластомерных композитов как составляющие химико-технологической системы.

Производственные процессы включают в себя: подготовку каучука и ингредиентов; их развеску; собственно, процесс смешения каучука с ингредиентами, приводящий к образованию промежуточного продукта – сырой резиновой смеси, полуфабриката; процесс структурирования; а также контроль и управление процессами смешения и структурирования эластомерных композитов на этапе резиновой смеси и готового изделия.

Потребности современного мира в изделиях из эластомеров огромны – трудно представить себе отрасль промышленности или народного хозяйства, которая обходится без них.

В настоящее время требования к уровню свойств изделий из эластомеров все более ужесточаются. Для получения кондиционных изделий с требуемым комплексом свойств необходимо четкое соблюдение последовательности и параметров всех подготовительных и технологических операций и стадий резинового производства [16].

Повышению качества готового продукта способствует применение методов контроля и управления процессами смешения и структурирования, системный анализ производственных процессов, их детальное вербальное и математическое описание, а также информационное обеспечение принятия решений при контролировании процессов смешения и вулканизации на основе анализа реометрических кривых и информационных баз данных [56].

Организация управления процессом структурирования эластомерных композитов невозможна без его информационной поддержки на основе современных информационных технологий и систем.

Большое разнообразие составов резиновых смесей, которое насчитывает до полутора тысячи рецептов, а также индивидуальные для каждого полуфабриката параметры переработки в изделия диктуют необходимость создания информационной базы данных для организации информационных процессов сбора, обработки и передачи реометрической информации.

Для принятия решений по рациональному управлению и контролю процессов смешения и структурирования эластомерных композитов необходимо предоставление наиболее полных сведений о процессах, что диктует необходимость объединения всей доступной информации в информационную базу данных. Решение этих задач требует проведения системного анализа связей и закономерностей функционирования и развития объектов и процессов с учетом отраслевых особенностей на основе информационной технологии баз данных, теории управления и принятия решений.

Значительный вклад в развитие методологии системного анализа к оптимизации многоассортиментных химико-технологических систем внесли российские учёные: академик РАН Кафаров В.В., академик РАН Мешалкин В.П., профессор Дворецкий С.И., профессор Дорохов И.Н., профессор Макаров В.В., профессор Островский В.А., профессор Егоров А.Ф., член корр. РАН Новиков Д.А., профессор Краснов А.Е., профессор Костров А.В., профессор Лабутин А.Н., а также зарубежные ученые: L. Puigjaner, М.Д. Месаровић, D. Masko, Y. Takaraha и ряд других исследователей.

Теоретические основы структурного системного анализа, организационного управления, технологий баз и хранилищ данных разрабатывали Н.Н. Моисеев, В.В. Келли, И.Б. Блауберг, Э.Г. Юдин, В.Н. Садовский, П. Друкер, Р. Каплан, Д. Нортон, К.Дж. Дейт, Х. Дарвен, Э. Спирли, Д. Крэнке, М.П. Когаловский, Колыбанов К.Ю., Корнюшко В.Ф. и другие.

Однако, задачи алгоритмическо-информационного обеспечения системного анализа автоматизированного процесса структурирования многокомпонентных эластомерных композитов для оптимизации показателей химико-технологических процессов структурирования сложных многокомпонентных эластомерных композитов имеют важное самостоятельное научное значение.

В связи с этим, **актуальной научной задачей** является разработка алгоритмическо-информационного обеспечения системного анализа автоматизированного процесса структурирования многокомпонентных эластомерных композитов, решение которой позволит повысить эффективность производства с использованием автоматизированной системы управления производством многокомпонентных эластомерных композитов.

Объект исследования: процесс структурирования многокомпонентных эластомерных композитов как стадия сложного химико-технологического процесса производства продукции из эластомеров.

Предмет исследования: информационное и алгоритмическое обеспечение системы обработки реометрической информации для управления химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности процесса структурирования эластомерных композитов за счет информационно-алгоритмического обеспечения автоматизированной обработки реометрической информации на основе физико-химических представлений и кинетических моделей, создание информационной базы данных типовых реограмм состояния, идентифицируемых на основе параметров математических моделей.

Для достижения поставленной цели поставлены и решены следующие **основные задачи:**

1. разработать математическое и функциональное описание процессов смешения и структурирования эластомерных композитов на основе анализа реометрических кривых;
2. установить по данным анализа реометрической информации количественные соотношения между параметрами используемых математических моделей и вулканизационными характеристиками, используемыми в технологии структурирования эластомерных композитов.
3. разработать алгоритмическое и программное обеспечение для расчета основных параметров моделей реограмм состояния эластомерных композитов на основе экспериментальных данных, позволяющее получать устойчивые статистические оценки реометрических данных.
4. найти оценки качества резиновой смеси и контроля готового изделия и выявления брака с помощью комплекса информационных моделей, формализующих последовательное преобразование ресурсов в готовую продукцию на основе различных регламентирующих документов представленных картой смеси и паспортом смеси.
5. разработать методику и алгоритмы построения базы данных реограмм состояния, построенных на основе экспериментальных данных для сбора, систематизации, анализа, и типизации реографической информации, организации ее хранения и передачи.
6. разработать архитектуру интеллектуальной базы знаний для управления процессами структурирования эластомерных композитов, на основе данных анализа реографической информации.

Методы решения поставленных задач. Поставленные задачи решались путем теоретических и практических исследований. При решении задач диссертационного исследования использовались методы: математического моделирования, математического анализа, вычислительной математики, методология функционального моделирования SADT.

Научная новизна.

1 Разработано математическое и функциональное описание процессов смешения и структурирования эластомерных композитов на основе анализа реометрических кривых, что отличается от известных моделей описания процессов структурирования рассмотрением зависимости момента сопротивления материала деформирования от времени как функции распределения независимых случайных величин, и позволяет получать устойчивые статистические оценки процесса.

2 Впервые с системных позиций рассмотрено управление жизненным циклом производства эластомерных материалов и изделий, что служит теоретической основой управления полным циклом разработка – производство – дистрибуция продукции из эластомерных композитов на основе интегральных информационных систем класса ERP.

3 По данным анализа реометрической информации установлены количественные соотношения между параметрами используемых математических моделей и вулканизационными характеристиками, используемыми в технологии структурирования эластомерных композитов, что отличается от используемых ранее математических моделей процесса возможностью интерпретации коэффициентов математических моделей на основе физико-химических представлений и подходов.

4 Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для расчета основных параметров моделей реограмм состояния на основе экспериментальных данных, позволяющее получать устойчивые статистические оценки реометрических данных, что отличается от используемых ранее математических моделей процесса структурирования представлением кривых скорости процесса как функции распределения случайных величин, что позволяет провести статистический анализ, включающий расчет четырех моментов распределения (амплитудный анализ).

5 Найдены оценки качества резиновой смеси и контроля готового изделия и выявления брака с помощью комплекса информационных моделей,

формализующих последовательное преобразование ресурсов в готовую продукцию на основе различных регламентирующих документов представленных картой смеси и паспортом смеси.

6 Впервые с позиций системного анализа созданы методика и алгоритмы построения базы данных реограмм состояния эластомерных композитов, построенных на основе экспериментальных данных для сбора, систематизации, анализа и хранения реографической информации и применяемых для интеллектуальной поддержки при принятии решений управления процессами структурирования.

7 Разработана архитектура интеллектуальной базы знаний для управления химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов, на основе данных анализа реографической информации, отличающаяся от существующих информационных баз данных тем, что в ней помимо стандартных вулканизационных характеристик хранятся параметры описывающих их математических моделей.

Основная теоретическая значимость. На основе проведенных теоретических исследований, предлагается алгоритмическо-информационное обеспечение автоматизированной обработки реометрической информации для управления химико-технологическими процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов. Применение результатов исследований позволит повысить эффективность функционирования химико-технологической системы производства изделий из эластомерных композитов.

Практическая значимость реализации работы. На основе обобщения проведенных исследований реализовано информационное и алгоритмическое обеспечение для операций управления и контроля процессов смешения и структурирования эластомерных композитов.

Методики и алгоритмы построения информационного обеспечения системы управления технологическим процессом структурирования эластомерных композитов реализованы в учебном процессе кафедр «Химии и технологии переработки эластомеров» и «Информационные системы в химической

технологии» Московского технологического университета при чтении спецкурсов для магистрантов и аспирантов. Интеллектуальный учебно-научный тренажер по системному анализу и управлению химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов использовался для обучения работников химической отрасли на курсах повышения квалификации в Государственном институте повышения квалификации и профессиональной переподготовке специалистов химической, микробиологической и медицинской промышленности МИТХТ им. М.В. Ломоносова.

На защиту выносятся результаты теоретических исследований, а именно:

1. системный анализ производства продукции из многокомпонентных эластомерных композитов;
2. математические и информационные модели описания и анализа химико-технологических процессов структурирования эластомерных композитов;
3. архитектура интеллектуального обеспечения экспертной системы принятия решений по автоматизированному управлению химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов;
4. интеллектуальный учебно-научный комплекс-тренажер по системному анализу и управлению химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов.

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов гарантируется строгостью используемого математического аппарата и подтверждается сравнением результатов, полученных с использованием различных методов и вычислительных экспериментов. Сформулированные в работе допущения обоснованы как путем их содержательного анализа, так и методами математического моделирования. Результаты диссертационной работы согласуются с известными результатами других авторов.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: «Наукоемкие химические технологии» в Москве в 2015-2016 г., «Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности» в

Смоленске в 2015г., «Моделирование и оптимизация химико-технологических процессов» в Казани в 2016 г., «Актуальные вопросы химической технологии и защиты окружающей среды» в Чебоксарах в 2016г., «XV Международная научно-практическая конференция Актуальные проблемы науки 21-го века» в Москве в 2016 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 5 статей в изданиях из перечня ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, глоссария, двух приложений, списка литературы.

ГЛАВА 1 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

1.1. Резина как сложный эластомерный многокомпонентный композиционный материал

Эластомерные композиционные материалы – особый класс уникальных мягких конструкционных полимерных материалов, способных легко деформироваться под действием небольших нагрузок и восстанавливать свою форму после весьма значительных деформаций. Наиболее известным и распространенным видом эластомерных конструкционных материалов являются резины – большая группа композиционных материалов, получаемых в результате химического пространственного структурирования каучуков. Каучуки используются в резине в качестве полимерной основы.

Резина не является идеально упругим телом, и при ее деформации и последующем восстановлении формы рассеивается довольно большое количество энергии. Это позволяет применять ее в качестве амортизирующего и звукопоглощающего материала.

Важной характеристикой резины является ее малая твердость (по сравнению с другими твердыми материалами) в сочетании с локальными деформациями упругого характера [1, 3, 8, 13].

К резинам, применяемым для изготовления изделий, предъявляется определенный комплекс требований в соответствии с конкретными условиями эксплуатации.

Резина как многокомпонентная система

Резина представляет собой сложную многокомпонентную систему, состоящую из полимерной основы и различных химических добавок (ингредиентов). (Рисунок 1.)

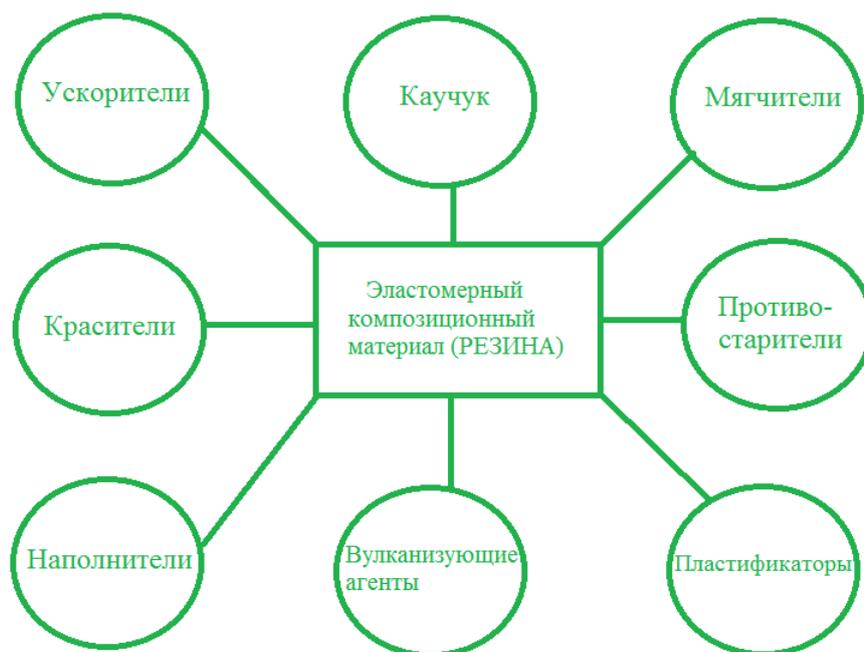


Рисунок 1. Состав эластомерного композиционного материала

Описание технологического процесса структурирования эластомерных систем

Процесс структурирования представляет собой химический процесс превращения сырой пластичной резиновой смеси в эластичную резину, и технологический процесс получения изделия, резины, эластомерного композиционного материала, путем закрепления требуемой формы для обеспечения требуемой функции изделия.

На начальном этапе имеются каучук и различные ингредиенты. После развески приступают к процессу смешения. Процесс смешения проводят на вальцах или в резиносмесителе. В результате мы получаем заготовку – сырую резиновую смесь – промежуточный продукт, которую в дальнейшем подвергают структурированию. На этапе сырой резиновой смеси контролируется равномерность смешения, проверяется состав смеси, оценивают ее вулканизационную способность.

В результате вулканизации получают готовое изделие. Точное соблюдение установленных параметров смеси необходимо для получения изделия с требуемым уровнем заданных свойств.

1.1.1. Аналитический обзор современных научных исследований по системному анализу и автоматизированному управлению сложными химико-технологическими процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов

Изделия из эластомерных композитов применяются в различных отраслях промышленности. Они работают при различных статических и динамических, нагрузках, в большом интервале температур, в сложных эксплуатационных условиях. Поэтому высокие качественные показатели и стабильность параметров готового продукта являются основополагающими требованиями к каждому производителю [16].

В таблице (1) представлен обзор диссертаций по рассматриваемой научной задаче.

Таблица 1. Обзор диссертаций

№	Тема диссертации	Цель	Автор научной работы, год защиты	Специальности ВАК
1	Разработка методов анализа и синтеза гибких многоассортиментных химических производств периодического действия	Развить методологию системного подхода к исследованию многоассортиментных химических производств периодического действия, разработать математические модели, методы и универсальные методики анализа и синтеза модульных производств с учетом гибкости.	Бельков, Валерий Петрович, Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2004	05.13.01
2	Количественная интерпретация кинетических кривых процесса вулканизации в системе организации рабочего места технолога-резинщика	Формирование основных приемов рациональной интерпретации кинетических кривых процесса вулканизации и создание для этого комплекса программ-модулей, позволяющих специалисту работать на действительно современном уровне.	Кашкинова Юлия Викторовна, Москва, МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 2005	05.17.06
3	Модельное и информационное обеспечение автоматизации управления	Разработка и применение комплекса моделей оптимизации планирования промышленного производства продукции на основе биологического сырья в условиях	Матасова, Юлия Альбертовна, Новосибирск, Новосибирский	05.13.01, 05.13.06

	промышленным производством в условиях влияния множества стохастических факторов	влияния множества стохастических факторов.	государственный технический университет 2003	
4	Математическое и имитационное моделирование процесса экспертного оценивания объектов	Математическое моделирование и построение методов оценивания объектов экспертом и разработка на их основе маркетинговой экспертной системы.	Пушкарев Александр Николаевич, Тюмень, Тюменский государственный университет, 2013	05.13.18
5	Реокинетика отверждения и свойства связующих и клеев на основе эпоксидных олигомеров	Разработка клеевых материалов и связующих на основе эпоксидного олигомера ЭД-22, модифицированного эпоксидноволаком, а также изучение процесса отверждения исследуемого связующего, построение, анализ и уточнение реокинетических моделей, описывающих характерные закономерности процесса отверждения, а также сопоставление результатов, полученных различными методами.	Волков Александр Сергеевич, Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2009	05.17.06
6	Синергические системы в многокомпонентных эластомерных материалах: идентификация, анализ, формирование	Разработка методологических принципов идентификации, анализа и формирования синергических систем компонентов эластомерных композиций; оптимизация их составов с учетом предъявляемых требований к изделиям, что в совокупности позволяет научно обоснованно решать практические задачи рецептуростроения эластомерных материалов и выбора параметров технологических процессов их переработки.	Наумова Юлия Анатольевна, Москва, МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 2012	05.17.06
7	Автоматизация периодических процессов ферментации производства антибиотиков медицинского назначения	Повышение эффективности производства антибиотиков медицинского назначения путем построения системы автоматизации комплекса взаимосвязанных периодических процессов стадии ферментации на основе новых алгоритмов управления, способов, систем автоматического управления и регулирования технологических параметров нестационарных	Лубенцов, Валерий Федорович, Новочеркасск, Южно-Российский государственный технический университет, 2006	05.13.06

		процессов получения биомассы мицелия и биосинтеза целевого продукта, пригодных для широкого промышленного внедрения		
8	Разработка комплексной автоматизированной информационно-й системы для создания, хранения и предоставления информации в области химии и химической технологии	Разработка моделей и алгоритмов для реализации комплексной автоматизированной информационной системы для создания, хранения и предоставления информации в области химии, химической технологии и смежных отраслей знаний.	Кульков Сергей Сергеевич, Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2007	05.13.01 05.13.18
9	Автоматизация сложных химико-технологических производств (на примере производств фенола-ацетона и полиэтилена в реакторах смешения)	Исследование возможности унифицированного подхода к созданию АСУТП сложным химическим производством на современной микроконтроллерной технике, постановка и решение задачи управления сложным нелинейным объектом на примере реактора полимеризации этилена с перемешивающим устройством	Шауро Василий Сергеевич, Москва, Московский университет инженерной экологии, 2006	05.13.06
10	Энергосберегающие технологии вулканизации в автоматизированных системах производства резиновых изделий	Повышение энергоэффективности технологического комплекса для термообработки резиновых изделий под давлением.	Киргин Дмитрий Сергеевич, Иркутск, Иркутский государственный технический университет, 2013	05.13.06
11	Методы и алгоритмы моделирования и управления технологическими процессами вулканизации в подсистемах транспортной системы	Разработка методики и теоретических положений, специального математического и алгоритмического обеспечения, позволяющих повысить эффективность функционирования транспортной системы, средств реализации оптимальных режимов проведения ремонтных работ при изменяющихся внешних и внутренних условиях.	Денисов Анатолий Петрович, Тамбов, тамбовский государственный технический университет, 2002	05.13.06

12	Автоматизированная система управления вулканизационными характеристиками резиновой смеси в производстве резинотехнических изделий	Создание системы управления, обеспечивающей повышение стабильности механических характеристик резинотехнических изделий в условиях изменения характеристик исходных ингредиентов.	Сочнев Александр Николаевич, Саратов, Саратовский государственный технический университет, 2008	05.13.06
13	Системный анализ и синтез информационно-измерительной ультразвуковой системы контроля качества эластомеров	Разработка методологии синтеза информационно-измерительной УЗ-системы контроля показателей качества аморфных эластомеров и их растворов для повышения эффективности систем управления периодическими и непрерывными технологическими процессами в производстве и переработке эластомеров, обеспечивающей с достаточной точностью воспроизведение совокупности используемых методов контроля качества, автоматизацию и оперативность оценки спектра показателей качества производимой продукции.	Хвостов Анатолий Анатольевич, Воронеж, Воронежская государственная технологическая академия, 2011	05.13.01
14	Принципы, методы и алгоритмы построения систем управления технологическими процессами со структурной неопределенностью	Формирование концепции, разработка теоретических положений, методов и алгоритмов, позволяющих ставить и решать задачи построения СУ ТП, соответствующих классу систем со свойствами структурной неопределенности; в применении полученных результатов для построения СУ конкретными ТП.	Сергин Михаил Юрьевич, Тамбов, Тамбовский государственный технический университет, 2004	05.13.06

В работах 1–2 значительное внимание уделено системному и математическому описанию химико-технологических процессов и производств, в частности, производству продукции из многокомпонентных эластомерных композитов. Работа (2) посвящена «разработке и формированию основных приемов рационального интерпретирования кинетических кривых процесса вулканизации и созданию для этого комплекса программ-модулей» [9]. Проведен анализ кинетических кривых трех типов, предложены математические

зависимости для описания реограмм состояния, показана целесообразность математической интерпретации реометрической информации для интенсификации производственных процессов, анализа причин отклонений технологических величин от заданных параметров. Показана возможность построения на основе математической модели кинетических уравнений для описания процесса структурирования эластомерных композитов и вычисления на их основе констант скорости процесса.

Работы 3-4 посвящены разработке модельного и информационного обеспечения автоматизации управления производственными процессами в условиях присутствия множества источников изменчивости, а также системе управления на основе экспертных оценок, чему в полной мере отвечает эластомерная композиционная система.

В работе (6) осуществлена «разработка методологических принципов идентификации, анализа и формирования синергических систем компонентов эластомерных композиций; оптимизация их составов с учетом предъявляемых требований к изделиям, что в совокупности позволяет научно обоснованно решать практические задачи рецептуростроения эластомерных материалов и выбора параметров технологических процессов их переработки» [10].

В проведенных ранее исследованиях показано, что повышения качественных показателей готовой продукции и экономической эффективности производства можно достичь путем применения методов управления [16].

Работы (7)–(9) и (11) посвящены решению проблемы автоматизации химико-технологических процессов и производств, направлены на повышение эффективности производства путем применения в системе управления новой алгоритмической и информационной поддержки системы принятия управленческих решений.

В настоящее время одним из перспективных направлений модернизации производств является повышение энергоэффективности как отдельных процессов, так и всего химико-технологического комплекса. В работе (10) предложены

решения по повышению энергоэффективности технологического комплекса для термообработки резиновых изделий под давлением.

В работах (12)–(14) предложены решения для управления технологическим процессом производства резинотехнических изделий разработаны автоматизированные системы управления транспортировкой и дозировками исходных ингредиентов, многими режимными параметрами, качественными показателями резиновых смесей, процессом структурирования.

В работе (5) произведен сравнительный анализ отработки влияния изменения характеристик исходных ингредиентов путем создания системы управления густотой вулканизационной сетки на стадии вулканизации и системы управления вулканизационными характеристиками резиновой смеси на выходе первой стадии путем корректировки массовых дозировок исходных ингредиентов. Второй вариант является более эффективным, т.к. позволяет уменьшить дефектность структуры резины путем компенсации изменения характеристик исходных ингредиентов изменением их количества.

Произведено исследование объекта управления вулканизационными характеристиками резиновой смеси: выбор управляющих воздействий, построение математических моделей объекта управления по управляющим воздействиям, показана достаточность выбранных управляющих воздействий для компенсации имеющихся возмущающих воздействий, построены математические модели формирующих фильтров для генерации возмущающих воздействий, произведены анализ управляемости и наблюдаемости объекта управления.

В проведенных ранее работах по управлению химико-технологическими процесса структурирования многокомпонентных эластомерных композитов выбрана идея повышения стабильности эксплуатационных свойств резинотехнической продукции путем создания системы стабилизации характеристик процесса структурирования эластомерного композита [14].

Показано, что основными механизмами процесса получения резиновой смеси являются массообменные и тепловые процессы, диспергировании, смешении ингредиентов. В настоящее время выходными параметрами стадии приготовления

резиновой смеси являются вязкость по Муни, твердость по Шору А и другие указанные выше контролируемые параметры резиновой смеси [14].

Для решения поставленной задачи стабилизации вулканизационных характеристик получаемой резиновой смеси в качестве выходных параметров дополнительно вводятся максимально получаемый момент сдвига и константа кинетики вулканизации.

Для отработки возмущений по реакционным способностям ингредиентов в качестве управляющих воздействий могут использоваться массы дозировок исходных ингредиентов, ответственных за вулканизационные характеристики [9, 14].

Таким образом, выбранные контрольные параметры отображают состояние резиновой смеси, выявляют влияние возмущающих воздействий и могут использоваться для управления характеристиками резиновой смеси. В качестве объектов управления реакционной способностью используются массы дозировок ингредиентов (на этапе приготовления эластомерного композита).

В более ранних исследованиях для получения количественных оценок вулканизационных характеристик резиновой смеси производилась аппроксимация полученных кривых уравнениями кинетики первого порядка и последующих порядков и получены оценки констант кинетики и максимального достижимого момента сдвига вулканизата [1–5].

Предложенная система управления представляет собой систему управления по косвенным показателям, т.к. основные характеристики процесса структурирования эластомерных композитов не могут быть измерены прямо, а находятся путем отбора и испытаний проб полуфабриката на стадии смешения эластомерного композита [68, 69, 72]. На основании полученных по испытаниям проб данных виброреометрии строится математическое описание процесса на основе нелинейных относительно параметров моделей. Вулканизационные характеристики находятся из физико-химических соотношений и выражаются через параметры математических моделей.

1.2. Системный анализ управления жизненным циклом продукции из эластомерных композитов

Жизненный цикл системы производства продукции из эластомерных композитов начинается с момента принятия решения о необходимости создания производственной системы и заканчивается в момент ее полного изъятия из эксплуатации.

Жизненный цикл продукции из многокомпонентных эластомерных композитов – совокупность процессов, выполняемых от момента выявления потребностей общества в определенной продукции до момента удовлетворения этих потребностей и ее утилизации [73].

Основным нормативным документом, регламентирующим жизненный цикл, является международный стандарт ISO 9004-1 (ISO – International Organization of Standardization – Международная организация по стандартизации) и ГОСТ 22487-77. Стандарты определяют структуру ЖЦ, содержащую процессы, действия и задачи, которые должны быть выполнены во время создания системы.

Характер системы или объекта рассмотрения и протекающие в ней процессы определяют содержание этапов ее жизненного цикла.

Проведен системный анализ управления жизненным циклом продукции из эластомерных композитов. (Рисунок 2)



Рисунок 2. Система управления на основе интегральной информационной системы ERP жизненным циклом разработки, производства и дистрибьюции продукции из эластомерных композитов

ERP(англ. Enterprise Resource Planning System) - система планирования ресурсов предприятия. Это интегрированная система на базе информационных технологий для управления внутренними и внешними ресурсами предприятию. Цель системы - объединение потоков информации между всеми хозяйственными подразделениями внутри предприятия. *ERP* система позволяет сформировать стандартизированное, единое информационное поле предприятия. Другими словами *ERP* система - единая точка ввода, единый центр обработки и единый источник информации о деятельности предприятия [74].

В зарубежных системах управления, а вслед за этим и у нас, все большее распространение получают интегрированные системы семейства SAP ERP.

SAP ERP(SAP R/3) включает в себя три основные функциональные области, поделенные на модули. (Рисунок 3)

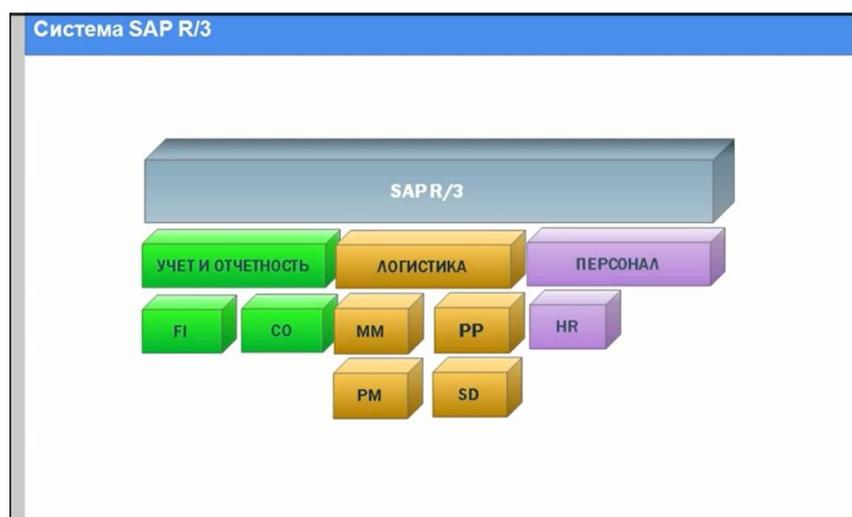


Рисунок 3. Модульность системы управления SAP R/3

Отчет и отчетность - официальный бухгалтерский учет, учет дебиторов, кредиторов, основных средств, управление финансами, бухгалтерский баланс, главная книга, управление имуществом, внутрипроизводственный учет затрат по местам их возникновения, управление заказами, учет результатов хозяйственной деятельности, управление денежными средствами.

- *Модуль FI (Financial Accounting)* - финансы и учет, реализует классический бухгалтерский и финансовый учет. *Модуль CO(Controlling)* - контроллинг, позволяет реализовать управленческий учет, отличающийся от бух.

учета направленностью на анализ мест и причин прихода и расхода средств, возникновения прибылей и убытков;

- *Логистика* - объединяет планирование, управление производством и закупками, материально-техническое снабжение, управление запасами, сбыт, продажа, выставление и контроль счетов, отгрузка.

- *Модуль ММ (Material Management)* - управление закупками и материальными потоками. Управление цепочкой поставок, эта цепочка включает в себя сеть розничной торговли, дистрибьюторов, транспортных компаний, складов и поставщиков;

- *Модуль РР (Production Planning)* - планирование и управление производством. Обеспечивает управление дискретным производством, а также производством с непрерывным циклом;

- *Модуль SD (The Sales and Distribution)* - управляет сбытом продукции, обеспечивает отгрузку, комплектацию товаров, выставление счетов покупателям;

Сама система представляет собой «конструктор» из связанных между собой модулей, каждый из которых отвечает за определенные задачи предприятия. Названия модулей — сокращения от функционала: FI — finance (финансы), LO — logistic (логистика), SD — sales and distribution (продажи и дистрибуция), HR — human resources (персонал), и т.д.

Представлена схема реализации системного подхода к управлению полным циклом разработка – производство – дистрибуция продукции из эластомерных композитов. Важно отметить, что разработанные в настоящее время функциональные блоки интегральных информационных систем ERP позволяют уже сегодня при наличии соответствующих программно-аппаратных интерфейсов реализовать многие функции управления, исключая научно-исследовательские работы и проектно-конструкторскую разработку (в нашем случае это разработка продукта и подготовка процессов переработки эластомерных композитов), которые весьма специфичны и всегда требуют индивидуального подхода.

Жизненный цикл продукции из многокомпонентных эластомерных композитов начитается с маркетинговых исследований рынка на предприятии-изготовителе и заканчивается ее утилизацией.

После полных маркетинговых исследований начинаются процессы разработки продукта – в нашем случае готового изделия с комплексом заданных на этапе рецептуростроения свойств.

Для получения требуемой продукции необходимо четкое построение системы процессов переработки каучука и ингредиентов в полуфабрикат – сырую заготовку, а также ее структурирование (вулканизация), как итоговый процесс производства готовой продукции из эластомерных композитов [65–71].

Для получения продукции надлежащего качества необходимо тестирование продукта – полуфабриката на каждом этапе производственного процесса.

Прошедшая контроль готовая продукция отправляется на складское хранение, откуда она поступает на реализацию, т.е. выходит на рынок.

1.3. Физико-химические модели сложных химико-технологических процессов структурирования эластомерных композитов на основе применения метода вибрационной реометрии

В основу построения физико-химической модели сложного химико-технологического процесса структурирования многокомпонентных эластомерных композитов в работе положено математическое моделирование состояний многокомпонентного эластомерного композита в нотациях Кельвина Фойгта, Гука и Алфрея. В качестве основной методики для определения количественных показателей процесса структурирования эластомерных композитов использовалась методика вибрационной реометрии [1, 14, 15].

Сущность метода определения вулканизационных характеристик с помощью сдвигового вибрационного реометра заключается в измерении крутящего момента при сдвиговой деформации образца резиновой смеси, вызываемой колебаниями ротора с биконическим диском с определенной

частотой и амплитудой при заданной температуре (обычно температуре вулканизации) [1, 15].

При проведении испытания на вибрационном реометре материал подвергается постоянным знакопеременным сдвиговым деформациям, что позволяет записать в процессе испытания одного образца непрерывную кривую изменения свойств материала, отражающую не только изменение пластоэластических характеристик резиновой смеси, но и ее вулканизационные характеристики, а также показатели модулей упругости вулканизатов [25].

Определение вулканизационных характеристик резиновых смесей методом вибрационной реометрии стандартизировано. В нашей стране, США и других странах действуют национальные стандарты на метод определения вулканизационных характеристик резиновых смесей с помощью вибрационных сдвиговых реометров (ГОСТ 12535-84, ASTM D2084) [26-29]. В рамках международной организации по стандартизации на этот метод действует стандарт JS0 3417 [28].

Момент сопротивления сдвигу, регистрируемый реометрическими приборами, пропорционален сдвиговым напряжениям, возникающим в массе образца. Резиновая смесь в реологическом смысле является упруговязким телом. При малых деформациях поведение резиновых смесей и резин описывается моделью Кельвина-Фойгта [30].

Считается, что закон Гука справедлив для упругой деформации полимерного материала, а закон Ньютона – для вязкого течения. При испытании на вибрационном сдвиговом реометре материал подвергается знакопеременным деформациям с частотой ω . Деформация материала под действием внешних сил изменяется в этих условиях по закону [30, 31]:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (1)$$

где γ_0 - амплитуда деформации, град.; ω - круговая частота, рад/с.

Дифференцируя соотношение (1) по времени, получим скорость деформации Y :

$$Y = \omega \cdot \gamma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (2)$$

Для материала, подчиняющегося закону Гука, напряжение упругой деформации $\tau_{упр.}$ примет вид:

$$\tau_{упр.} = G' \cdot \gamma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (3)$$

где G' - модуль упругости при сдвиговой деформации; $\tau_{упр.}$ - напряжение упругой деформации.

Для ньютоновской жидкости, с учетом формулы (2), напряжение пластической деформации выражается зависимостями:

$$\tau_{вяз.} = \mu \cdot Y = \mu \cdot \omega \cdot \gamma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) = G'' \cdot \gamma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (4)$$

где $G'' = \mu \cdot \omega$ – так называемая мнимая компонента динамического модуля сдвига или, иначе – модуль трения; μ – вязкость; $\tau_{вяз.}$ – напряжение пластической деформации.

Таким образом, для вязкоупругого тела имеем два симметричных выражения:

$$\tau_{упр.} = G' \cdot \gamma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t);$$

$$\tau_{вяз.} = G'' \cdot \gamma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t).$$

Максимальные значения напряжений $\tau_{упр.}$ и $\tau_{вяз.}$ будут наблюдаться при фазах,

отличающихся по величине на $\frac{\pi}{2}$:

$$\tau_{упр.} = G' \cdot \gamma_0; \quad \tau_{вяз.} = G'' \cdot \gamma_0.$$

Объединяя выражения, получим:

$$G^* = G + i\mu \cdot \omega = G + iG'', \quad (5)$$

где G^* - комплексный динамический модуль; i – мнимая единица, μ – вязкость.

При структурировании (подвулканизации и вулканизации) резиновых смесей происходит уменьшение модуля G'' и возрастание модулей G' и G , фазовый угол при этом, пройдя через максимум, резко уменьшается. При

постоянной амплитуде и частоте колебаний, которые в приборе имеют строго фиксированные значения, модуль G пропорционален вязкости μ . Поэтому для невулканизированных резин, когда $G'' > G'$, величина комплексного напряжения будет определяться большей частью вязкостью, а для подвулканизированных и вулканизированных – упругостью [15].

Приведенные соотношения удовлетворительно описывают поведение резиновых смесей, когда они находятся в области подвулканизированного состояния и в стадии вулканизации, но значительно хуже – резиновую смесь в ее первоначальном состоянии. Это обусловлено тем, что при математическом описании поведения резиноподобного материала по модели Кельвина-Фойгта невозможно моделировать процессы, приводящие к изменению свойств при вулканизации. Согласно этой модели вязкость сохраняет некоторое малое конечное значение, тогда как в действительности вязкость смеси возрастает до бесконечности.

Значительно лучше описывает поведение резиновой смеси в процессе вулканизации механическая модель Алфрея. Дифференциальное уравнение, описывающее эту модель, имеет вид:

$$\tau = G_1 \cdot \gamma_1 = G_2 \cdot \gamma_2 + \mu \cdot \dot{Y} = \mu_3 \cdot \dot{Y}, \quad (6)$$

В этой модели (Рисунок 4.) поведение полимера при его деформировании под действием напряжения сдвига представлено четырьмя элементами – G_1 , G_2 , μ_2 , μ_3 [32].

По существу данная модель является обобщением максвелловского и кельвиновского элементов. Элементы модели μ_2 , μ_3 называют микро- и макровязкостью. Под действием напряжения сдвига в аморфном резиноподобном полимере возникают три вида деформации: 1) мгновенная истинно упругая деформация; 2) высокоэластическая (запаздывающая) деформация, присущая полимерам; 3) деформация течения, свойственная простым (низкомолекулярным) жидкостям. В модели Алфрея эти три типа деформаций изображены с помощью элементов G_1 , G_2 , μ_2 , μ_3 . Применительно к условиям работы реометра фирмы

«Монсанто», когда реализуется низкочастотная знакопеременная деформация при высоких температурах, комплексное напряжение, реализуемое в полимере, подчиняется уравнению [32]:

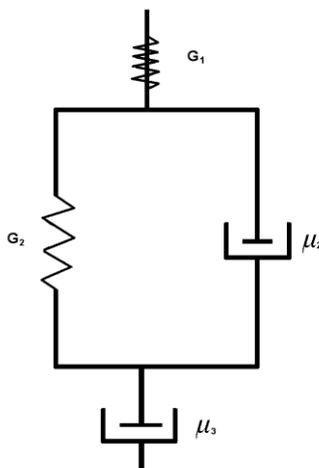


Рисунок 4. Механическая модель Алфрея

$$\tau^* \cdot \gamma_0 \cdot G^* = \gamma_0 \left[\left(\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \right) + i \cdot \frac{1}{\mu_3 \cdot \omega} \right], \quad (7)$$

где τ^* - комплексное напряжение.

Рассмотрим поведение материала, описываемого соотношением (7) в различных случаях:

а) если μ_3 сравнительно мало (вязкотекучее состояние, высокие температуры, вулканизация еще не началась), то

$$\frac{1}{\mu_3 \cdot \omega} \gg \left(\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \right), \quad (8)$$

и тогда

$$\tau^* = \gamma_0 \cdot \mu_3 \cdot \omega, \quad (9)$$

т. е. имеем обычное вязкое течение;

б) когда $\mu_3 \rightarrow \infty$ (вулканизация), а $G_2 \gg G_1$, что характерно для эластомеров, то

$$\tau = \gamma_0 \cdot \frac{I}{I/G_3} = \gamma \cdot G \quad (10)$$

т. е. наблюдается высокоэластическая деформация.

В переходной области имеем комплексное соотношение

$$\tau^* = \gamma_0 \cdot G^* \quad (11)$$

и измеряемое напряжение сдвига имеет в большей степени вязкую природу.

На реометрах типа «Монсанто-100» измеряется величина момента сопротивления сдвигу, пропорционального действительной части комплексного динамического модуля, а, следовательно, и $\tau_{упр.}$ в зависимости от степени структурирования полимера.

В последующем изложении измеряемый на реометре момент сопротивления деформированию или динамическая жесткость обозначается, как это принято в литературе, индексом « M ».

Первые приборы для изучения вулканизационных свойств резиновых смесей методом вибрационной реометрии были разработаны и запущены в массовое производство фирмой «Монсанто» (США). Реометр предназначен для определения вулканизационных характеристик и динамических свойств образца резиновой смеси.

Биконический диск (ротор) совершает колебательное движение в рабочей камере. Рабочая камера образована полуформами. Верхняя полуформа перемещается в вертикальной плоскости при загрузке и выгрузке образцов с помощью штока. Полуформы обогреваются электрическими обогревателями, смонтированными в плиты. Колебательное движение диска передается от мотора через эксцентрик и рычаг. На рычаге укреплен датчик напряжения, который связан с электронной регистрирующей системой.

На диаграмме регистрирующего устройства фиксируется в виде непрерывной кривой изменение сдвигового момента M в процессе прогрева и вулканизации резиновой смеси. С целью устранения проскальзывания на внутренней поверхности полуформ под углом 20° друг к другу нанесены

радиальные канавки прямоугольной формы. Диск (ротор) имеет на обеих сторонах подобные канавки, смещенные на 5° друг относительно друга. Стержень ротора заканчивается четырехгранником, с помощью которого он закрепляется на валу [33]. Температура матриц поддерживается с точностью $\pm 0.5^\circ\text{C}$ с помощью электронагревателей и терморегулирующей системы. Образец резиновой смеси должен полностью охватывать диск. Для заготовки испытываемых образцов резиновых смесей используется специальный вырубной пресс. На протяжении всего испытания образец находится под давлением. Стандартное давление воздуха на плунжере составляет 0.35 МПа, что обеспечивает давление внутри полости рабочей камеры около 4.2–5.6 МПа. Колебание диска осуществляется посредством эксцентрика в пределах ± 1 , ± 3 или $\pm 15^\circ$. Сила, требуемая для колебания диска (и, следовательно, приложенная к образцу резиновой смеси), измеряется электронным датчиком, расположенным на рычаге передачи вращающего момента к ротору. Частота колебаний ротора составляет 100 колебаний в минуту (1.66 Гц). Регистрация вулканизационной кривой на реометре Монсанто-100 осуществляется на стандартном бланке. Развертка кривой может быть осуществлена в течение 3, 6, 12, 15, 24, 30, 60 и 600 мин. Чувствительность шкалы М может быть установлена на 25, 50, 100 или 200 фунт-дюйм (дН·м). Кривые, вычерчиваемые реометром, являются графическим изображением характеристик процесса вулканизации резиновой смеси.

В результате испытания одного образца из реометрической кривой может быть извлечена обширная информация, дающая представление о свойствах сырой резиновой смеси, о кинетике процесса вулканизации и, в некоторой степени, о свойствах вулканизатов. В зависимости от состава резиновых смесей, температуры и продолжительности испытания на практике получают кривые трех типов (Рисунок 5):

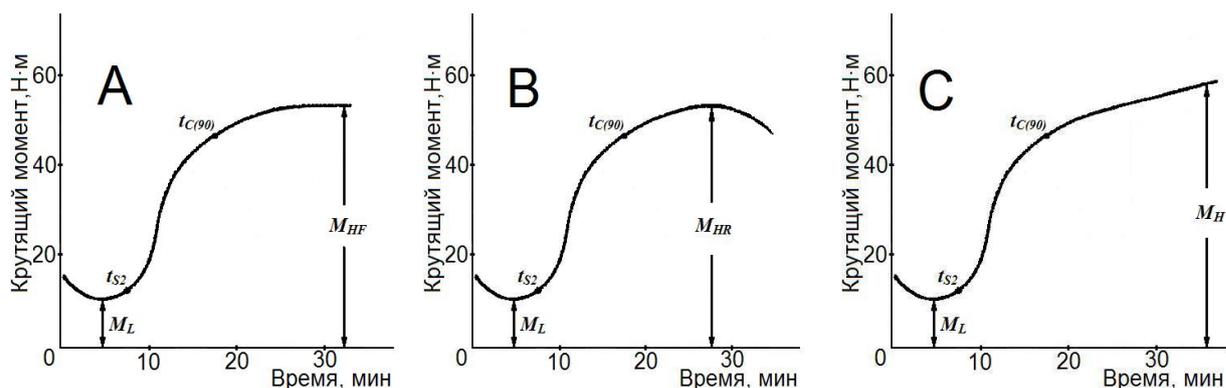


Рисунок 5. Иллюстрация реометрических кривых трех типов: **A** – кривые с достижением равновесного крутящего момента (M_{HF}) (плато вулканизации); **B** – кривые, у которых после достижения максимального значения крутящего момента (M_{HR}) наблюдается его снижение (реверсия); **C** – кривые, у которых после завершения основного периода вулканизации, наблюдается постоянное увеличение крутящего момента (M_H).

Реометрическую кривую условно можно разделить на три области (Рисунок б). Область **A** характеризует вязкость резиновой смеси, область **B** – процесс вулканизации и скорость его протекания, область **C** – физические свойства вулканизатов (твердость, модуль, плотность сшивки). На реометрической кривой могут быть выделены одиннадцать условных показателей, являющихся характеристиками свойств резиновых смесей и вулканизатов (Рисунки 5 и 6) [15, 26].

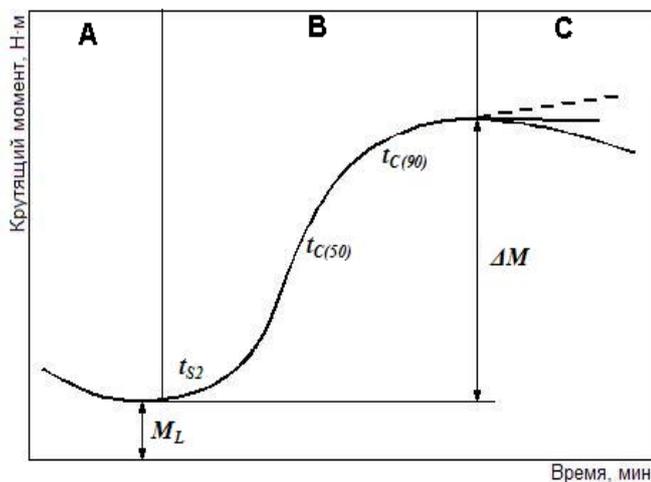


Рисунок 6. Основные точки на реометрической кривой: $M_{исх}$ – исходный крутящий момент, соответствующий исходной вязкости смеси; M_L – минимальный крутящий момент, соответствующий вязкости смеси при температуре испытания; M_{HF} – максимальный крутящий момент, соответствующий максимальной степени вулканизации для кривых типа **A**; M_{HR} – максимальный крутящий момент для кривых типа **B**; M_H – максимальный крутящий момент для кривых типа **C**; t_{S1} и t_{S2} – время, за которое, крутящий момент увеличивается на 0.1 Н·м от минимального значения крутящего момента M_L при амплитуде колебания ротора 1° . ΔM – разность максимального и минимального крутящих моментов.

Если пользоваться при испытании амплитудой колебания ротора 3° или 5° , то следует применять показатель t_{s2} , т.е. время, за которое крутящий момент увеличивается на 0.2 Н·м от минимального значения M_L . Показатели t_{s1} и t_{s2} характеризуют индукционный период вулканизации. Показатель ΔM характеризует плотность сшивки полимера. $\Delta M = M_{HF} - M_L$, Н·м или $\Delta M = M_{HR} - M_L$, Н·м;

$t_{C(90)}$ – время, за которое крутящий момент увеличивается до 90% своей максимальной (M_{HF}) величины. Показатель времени увеличения крутящего момента до $0.9 \Delta M$ соответствует оптимальному времени вулканизации;

$t_{C(50)}$ – время, необходимое для достижения 50%-ного увеличения максимального прироста крутящего момента (время увеличения крутящего момента на $0.5 \Delta M$);

$t_{C(Y)}$ – время достижения заданной степени вулканизации и соответствующее степени вулканизации Y , %. Показатель $t_{C(Y)}$ определяют по шкале времени от начала записи вулканизационной кривой до момента времени, соответствующего крутящему моменту: $M_L + \Delta M Y/100$;

t_r – время реверсии, мин, (для кривой B , рисунок 6) определяют по шкале времени от начала записи кривой до момента времени, соответствующего снижению M_{HR} на величину $M_{HR} \cdot X/100$. Величину X принимают обычно равной 10%.

Показатель скорости вулканизации R_V вычисляют по формуле:

$$R_V = \frac{100}{t_{C(90)} - t_S}, \text{ мин}^{-1}, \quad (12)$$

где $t_{C(90)}$ – оптимальное время вулканизации, мин; t_S – время начала вулканизации, мин.

Показатель скорости вулканизации пропорционален средней крутизне растущей ветви вулканизационной кривой. Крутящий момент, регистрируемый реометром, пропорционален модулю сдвига резиновой смеси при температуре испытания.

Как уже упоминалось, согласно стандартам [26–29] оптимальное время вулканизации $t_{C(90)}$ – это время, за которое крутящий момент достигает значения, равного $M = M_L + 0.9 \Delta M$. Расчет $t_{C(90)}$ по реометрическим кривым типа *A* и *B* не вызывает затруднений. Значения $t_{C(90)}$ обычно коррелируют со временем оптимума вулканизации, полученным по результатам физико-механических испытаний.

Сложнее определить значение величины $t_{C(90)}$ и продолжительность проведения испытаний резиновых смесей, для которых характерны реометрические кривые типа *C*. В этом случае оптимальное время вулканизации $t_{C(90)}$ определяется по методике в соответствии с ГОСТ 12535-84 [26].

Возможности использования результатов реометрических испытаний

Скорость вулканизации резиновой смеси является одним из наиболее существенных факторов, обуславливающих продолжительность вулканизации для достижения изготавливаемыми изделиями оптимальных свойств. Процесс вулканизации резиновой смеси проходит, как уже было отмечено, три стадии: индукционный период, стадию поперечного сшивания полимера (основной период) и стадию реверсии или перевулканнизации. Для определения кинетических параметров процессов вулканизации, протекающих в основном периоде, широко используется в настоящее время реометрический метод.

С помощью реометрических кривых можно произвести оценку температурного коэффициента вулканизации. При варьировании температуры вулканизации изменение крутящего момента обусловлено не только увеличением степени сшивания, но и одновременным изменением межмолекулярного и межфазового взаимодействия. Поэтому непосредственное сопоставление вулкаметрических кривых не позволяет оценить влияние температуры на степень сшивания. Для такой оценки необходимо приведение реометрических кривых к единой температуре испытания [14]. В общем случае это невозможно, поскольку температурная зависимость минимального и максимального моментов различна. Однако если ограничиться завершающей стадией вулканизации и пренебречь

реверсией, то указанное приведение осуществимо. При сделанном ограничении можно без большой погрешности принять, что текущее значение крутящего момента M меняется в зависимости от температуры так же, как и максимальное его значение M_{HF} . Выбрав одну из вулканметрических кривых, полученных при различных температурах, в качестве реперной, можно привести остальные к общей для всех температур T_0 . Для этого текущее значение момента пересчитывается в приведенное его значение M_{np} [36]:

$$M_{np} = M^T \cdot \frac{M_{HF}^{T_0}}{M_{HF}^T}, \quad (13)$$

где $M_{HF}^{T_0}$ – максимальный момент реперной вулканметрической кривой, полученной при температуре приведения; T – температура испытания.

Сравнение значений M_{np} в отличие от M^T , позволяет выявить влияние температуры вулканизации на степень сшивания. Время, отвечающее приведенному крутящему моменту, убывает с возрастанием температуры по экспоненциальному закону, и эта зависимость может быть использована для расчетов энергии активации и температурного коэффициента вулканизации.

Метод приведенного крутящего момента позволяет оценить значение температурного коэффициента вулканизации, т. е. дает полное представление о влиянии температуры вулканизации на плотность сшивки вулканизатов.

Кажущуюся энергию активации находят из опытных данных зависимости константы скорости вулканизации k от обратной температуры на основании уравнения Аррениуса:

$$k = A e^{-E/RT}, \quad (14)$$

где k – константа скорости реакции; A – постоянная, называемая предэкспоненциальным множителем или частотным фактором; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура. После соответствующих преобразований и перевода в десятичные логарифмы получено уравнение:

$$\lg k = \frac{-E}{2.303RT} + C \quad (15)$$

В соответствии с уравнением (15) зависимость $\lg k$ от обратной температуры $1/T$ описывается прямой линией.

В рассматриваемых системах (резиновых смесях) энергия активации называется кажущейся энергией активации, поскольку точно неизвестно, какая из протекающих реакций (вулканизация является сложным процессом, включающим в себя ряд стадий) лимитирует общую скорость процесса.

В случаях, когда известны константы скорости реакции при двух температурах, значение кажущейся энергии активации реакции вулканизации E можно вычислить по формуле:

$$E = \frac{4.576 \cdot T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \cdot \lg \frac{k_2}{k_1}, \quad (16)$$

где T_1 и T_2 – абсолютные температуры; k_1 и k_2 – константы скорости вулканизации при температурах T_1 и T_2 .

По литературным данным [8], для процесса вулканизации энергия активации, в зависимости от типа вулканизирующей группы и каучука, колеблется в пределах 19÷36 ккал/моль (79÷150 кДж/моль). При использовании современных реометров в сочетании с ЭВМ кажущаяся энергия активации вулканизации рассчитывается автоматически в процессе испытания.

Реометры могут быть использованы не только для получения информации о кинетике вулканизации резиновых смесей, но и для оценки структурных характеристик эластомеров [37–39]. Установлена корреляция между величиной крутящего момента и равновесным модулем резины.

В соответствии с существующими представлениями о механических свойствах резин в условиях динамического нагружения [40, 41] их динамический модуль упругости при сдвиге G может быть представлен в виде двух составляющих – равновесного модуля сдвига G_p , величина которого не равна нулю только в случае сшитых полимеров, и неравновесной релаксирующей части сдвига G_o :

$$G = G_p + G_o, \quad (17)$$

В процессе вулканизации резиновых смесей до невысокой густоты сетки [$\sim 2 \div 2.5$ % (мас.) связанной серы], характерной для технических резин, значение неравновесной части модуля сдвига существенно не изменяется, поэтому считают, что увеличение динамического модуля резиновой смеси при вулканизации связано в основном с возрастанием ее равновесного модуля сдвига.

В индукционном периоде вулканизации при вязкотекучем состоянии резиновой смеси ее равновесный модуль равен нулю, $G = G_o$. Этому периоду соответствует минимальная величина крутящего момента при испытании резиновой смеси. На следующих стадиях вулканизации при сшивании полимера динамический модуль резиновой смеси равен сумме равновесной и неравновесной составляющих. При испытании на реометре в этом случае величина крутящего момента возрастает.

В работе [38] предложен метод расчета модуля сдвига резиновой смеси по величине крутящего момента на реометре «Монсанто-100». Согласно этому методу, значение модуля сдвига определяется по уравнению:

$$G' = \frac{K \cdot (M - 0.5)}{\beta_0 - 0.005 \cdot (M - 0.5)}, \quad (18)$$

где K – коэффициент, зависящий от геометрических размеров рабочей камеры реометра (для камеры с микроротором диаметром 34 мм $K = 0,259$ град/см³); β_0 – номинальная амплитуда колебаний ротора, град; M – крутящий момент. Из уравнений (17) и (18) получим:

$$G_p = 0,259 \left[\frac{M - 0,5}{\beta_0 - 0.005 \cdot (M - 0.5)} - \frac{M_0 - 0,5}{\beta_0 - 0.005 \cdot (M_0 - 0.5)} \right], \quad (19)$$

где M_0 – минимальный крутящий момент на стадии индукционного периода.

Проведение испытаний для определения G_p рекомендуется проводить при амплитуде колебаний ротора 1° .

Авторы работы [39] предложили формулу для определения динамического модуля резиновых смесей G' на разных стадиях вулканизации, выведенную на

основании представлений о связи динамических воздействий при средних частотах нагружения со стационарным режимом деформирования:

$$G' = \frac{6 \cdot M}{\gamma \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \sqrt{4 \cdot l^2 - D^2}}, \quad (20)$$

где M – момент сопротивления сдвигу, кгс·см (Н·м); γ – амплитуда колебания ротора, рад; D – диаметр биконического ротора, см; l – длина образующей биконического ротора, см.

Для прибора Монсанто-100 при частоте колебаний биконического ротора 100 колеб./мин. и амплитуде колебаний 5° (0,0874 рад), $D = 1.9$ см, $l = 3.8$ см формула (20) принимает вид

$$G' = 2.34 \cdot M. \quad (21)$$

Величина условно-равновесного модуля G' может быть использована для определения некоторых параметров вулканизационной сетки. Как известно, в процессе вулканизации происходит сшивание макромолекул каучука в единую пространственную сетку. Степень поперечного сшивания («густота сетки»), существенно влияющая на весь комплекс физико-механических свойств, является одной из основных характеристик вулканизата.

С некоторыми допущениями степень поперечного сшивания может быть охарактеризована параметром β , определяемым следующим соотношением:

$$\beta = \frac{M - M_L}{M_{HF} - M_L}, \quad (22)$$

Более строгая оценка структурных параметров вулканизационной сетки может быть проведена с использованием теории деформации пространственной сетки, согласно которой равновесный модуль E_∞ однозначно связан с концентрацией поперечных связей в единице объема, т. е. может служить мерой густоты пространственной сетки [40, 41].

Для количественной характеристики пространственной сетки пользуются двумя параметрами [42, 43]:

M_c – средняя молекулярная масса отрезка цепи между соседними поперечными связями; N_c – концентрация этих отрезков в единице объема вулканизата.

Между M_c и N_c существует следующая зависимость:

$$N_c = \rho \cdot N_A / M_c, \quad (23)$$

где N_A – число Авогадро; ρ – плотность каучука.

Согласно формуле Уолла:

$$E_\infty = 3RT\rho / M_c, \quad (24)$$

где E_∞ – равновесный модуль; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; ρ – плотность каучука.

Поскольку в условиях испытаний на реометре фирмы «Монсанто» резиновая смесь подвергается относительно невысоким степеням деформации, то, пользуясь уравнением (23), можно определить величину M_c :

$$M_c = 3RT\rho / G_p, \quad (25)$$

а затем концентрацию отрезков цепей между узлами сетки.

Таким образом, метод реометрии позволяет не только контролировать процесс вулканизации, но и использовать получаемую информацию для расчета параметров вулканизационной сетки [9, 44].

1.4. Выводы

1. На основе аналитического обзора современных научных исследований по системному анализу и автоматизированному управлению процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов выявлены пути повышения эффективности управления процессами за счет применения методов математического моделирования.

2. Проведен системный анализ управления жизненным циклом продукции из эластомерных композитов, что позволяет теоретически построить интегральную информационную систему управления циклом Разработка-Производство-Дистрибуция продукции многокомпонентных эластомерных композитов на базе стандартных информационных систем класса ERP.

3. Построена физико-химическая модель сложного химико-технологического процесса структурирования многокомпонентных эластомерных композитов на основе применения метода вибрационной реометрии.
4. Показано, что математическое моделирование реограмм состояния позволяет организовать контроль и управление химико-технологическими процессами смешения и структурирования многокомпонентных эластомерных композитов.

ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

2.1 Разработка математических моделей реограмм состояния эластомерных компози́тов

Организация управления и контроля технологическими процессами производства эластомерных композитов, таких, как смешение и вулканизация (структурирование) в настоящее время построена на анализе реограмм состояния многокомпонентных эластомерных композитов. Большое значение здесь имеют эффективные методы количественной интерпретации реограмм состояния [9, 10, 15].

Для количественной интерпретации реограмм состояния (изотерм поперечного сшивания) целесообразно использовать модели, параметры которых могут быть выражены через вулканизационные характеристики [9, 10, 13, 15].

Для описания этой кривой с использованием программы Table Curve 2D целесообразно вести поиск в папке Curve-Fit Transition Functions.

Программа рассчитывает 15 уравнений.

По коэффициенту детерминации наилучшие модели расположились в такой последовательности: 8092 – 8189 – 8090 – 8082 – 8086 – 8013. Далее, по скорректированному коэффициенту детерминации: 8092 – 8189 – 8082 – 8090 – 8013 – 8086. По стандартной ошибке: 8092 – 8189 – 8082 – 8090 – 8013 – 8086. По критерию Фишера: 8092 – 8189 – 8082 – 8013 – 8090 – 8086. Среди шести уравнений два (8082 и 8013) имеют четыре параметра, и четыре уравнения (8092, 8189, 8090 и 8086) имеют пять параметров. Эти модели называют интегральными, поскольку они характеризуют степень завершенности процесса структурирования эластомерных композитов. Соответствующие формулы представлены в Таблице 2. Здесь t – время, $M(t)$ – крутящий момент [11].

Таблица 2. Математические модели интегральных кинетических кривых

№	Модель
8092	$M(t) = a + b \cdot \left(1 - \left(1 + \exp \left(\frac{t + d \cdot \ln(2^{1/e} - 1) - c}{d} \right) \right)^{-e} \right)$
8082	$M(t) = a + b \cdot \exp \left(- \exp \left(- \frac{t - d \cdot \ln(\ln(2)) - c}{d} \right) \right)$
8090	$M(t) = a + b \cdot \left(1 + \exp \left(- \frac{t - d \cdot \ln(2^{1/e} - 1) - c}{d} \right) \right)^{-e}$
8013	$M(t) = a + \frac{b}{1 + \left(\frac{t}{c} \right)^d}$
8086	$M(t) = a + b \cdot \left(1 - \exp \left(- \frac{t - d \cdot \ln(1 - 2^{-1/e}) - c}{d} \right) \right)^e$

Во всех представленных выше моделях параметр a соответствует минимальному крутящему моменту M_L , параметр b – приращению крутящего момента $M_H - M_L$ и параметр c – вулканизационной характеристике t_{50} .

Анализ более чем двухсот реограмм резиновых смесей на основе различных каучуков с использованием широкой гаммы вулканизирующих систем показал, что в семидесяти случаях из ста для реограмм со стабилизирующимся во времени t значением крутящего момента M следует отдать предпочтение модели следующего вида:

$$M = a + b \cdot \left(1 - \left(1 + \exp \left(\frac{t + d \cdot \ln(2^{1/e} - 1) - c}{d} \right) \right)^{-e} \right).$$

Параметры d и e связаны между собой и с вулканизационными характеристиками следующим соотношением:

$$t_{c(90)} - t_{c(10)} = d \cdot \ln \left(\frac{10^{1/e} - 1}{10^{1/e} - 9^{1/e}} \right) + \frac{d}{e} \cdot \ln 9.$$

Переходя к степени вулканизации $\beta = (M - M_{min}) / (M_{max} - M_{min})$, получим соотношение для обобщенной реограммы:

$$\beta = 1 - \left(1 + \exp \left(\frac{t+d \cdot \ln(2^{1/e}-1)-c}{d} \right) \right)^{-e}.$$

При преобразовании моделей для каждой из них получены соотношения между параметрами t_{10} , t_{50} и t_{90} . Эти соотношения приведены в Таблице 3. Критерии качества интегральных моделей приведены в Таблице 4 [11].

Таблица 3. Соотношения между параметрами t_{10} , t_{50} и t_{90}

№	Соотношения
8092	$\begin{aligned} & (\ln(2^{1/e}-1) - \ln((10/9)^{1/e}-1)) \cdot t_{90} + (\ln(10^{1/e}-1) - \ln(2^{1/e}-1)) \cdot t_{10} = \\ & = (\ln(10^{1/e}-1) - \ln((10/9)^{1/e}-1)) \cdot t_{50}; \\ & \frac{t_{90}}{t_{10}} = \frac{t_{50} + (\ln(10^{1/e}-1) - \ln(2^{1/e}-1)) \cdot d}{t_{50} - (\ln(2^{1/e}-1) - \ln((10/9)^{1/e}-1)) \cdot d}; \\ & t_{90} - t_{10} = (\ln(10^{1/e}-1) - \ln((10/9)^{1/e}-1)) \cdot d \end{aligned}$
8082	$\begin{aligned} & (\ln(-\ln 0.1) - \ln(\ln 2)) \cdot t_{90} + (\ln(\ln 2) - \ln(-\ln 0.9)) \cdot t_{10} = (\ln(-\ln 0.1) - \ln(-\ln 0.9)) \cdot t_{50}; \\ & \frac{t_{90}}{t_{10}} = \frac{t_{50} + (\ln(\ln 2) - \ln(-\ln 0.9)) \cdot d}{t_{50} - (\ln(-\ln 0.1) - \ln(\ln 2)) \cdot d}; \quad t_{90} - t_{10} = (\ln(-\ln 0.1) - \ln(-\ln 0.9)) \cdot d \end{aligned}$
8090	$\begin{aligned} & (\ln(10^{1/e}-1) - \ln(2^{1/e}-1)) \cdot t_{90} + (\ln(2^{1/e}-1) - \ln((10/9)^{1/e}-1)) \cdot t_{10} = \\ & = (\ln((10/9)^{1/e}-1) - \ln(2^{1/e}-1)) \cdot t_{50}; \\ & \frac{t_{90}}{t_{10}} = \frac{t_{50} + (\ln(2^{1/e}-1) - \ln((10/9)^{1/e}-1)) \cdot d}{t_{50} - (\ln(10^{1/e}-1) - \ln(2^{1/e}-1)) \cdot d}; \\ & t_{90} - t_{10} = (\ln(10^{1/e}-1) - \ln((10/9)^{1/e}-1)) \cdot d \end{aligned}$
8013	$t_{10} \cdot t_{90} = t_{50}^2; \quad \frac{t_{90}}{t_{10}} = 9^{-2/d}; \quad t_{90} - t_{10} = t_{50} \cdot (9^{-1/d} - 9^{1/d})$
8086	$\begin{aligned} & (\ln(1-0.1^{1/e}) - \ln(1-2^{-1/e})) \cdot t_{90} + (\ln(1-2^{-1/e}) - \ln(1-0.9^{1/e})) \cdot t_{10} = \\ & = (\ln(1-0.1^{1/e}) - \ln(1-0.9^{1/e})) \cdot t_{50}; \\ & \frac{t_{90}}{t_{10}} = \frac{t_{50} + (\ln(1-2^{-1/e}) - \ln(1-0.9^{1/e})) \cdot d}{t_{50} - (\ln(1-0.1^{1/e}) - \ln(1-2^{-1/e})) \cdot d}; \\ & t_{90} - t_{10} = (\ln(1-0.1^{1/e}) - \ln(1-0.9^{1/e})) \cdot d \end{aligned}$

Таблица 4. Критерии качества моделей

№	Коэффициент детерминации	Скорректированный коэффициент детерминации	Стандартная ошибка	Критерий Фишера
8092	0.9999	0.9999	0.1161	63577.57
8082	0.9999	0.9996	0.2243	22704.62
8090	0.9999	0.9996	0.2294	16272.3
8013	0.9999	0.9996	0.2298	21631.81
8086	0.9999	0.9996	0.2315	15984.13

Уравнения расположены в порядке возрастания стандартной ошибки. Максимальная абсолютная погрешность определения отклика в ряду 8092 – 8082 – 8090 – 8013 – 8086 составила: 0.300 – 0.493 – 0.480 – 0.516 – 0.433, соответственно.

Сопоставим между собой коэффициенты моделей (таблица 5).

Таблица 5. Параметры использованных уравнений

Параметр	Уравнение				
	8092	8082	8090	8013	8086
<i>a</i>	6.415	6.408	6.381	6.229	6.385
	6.522	6.594	6.584	6.425	6.589
	6.628	6.781	6.788	6.620	6.793
<i>b</i>	27.114	26.820	26.815	26.996	26.809
	27.250	27.072	27.074	27.268	27.069
	27.387	27.323	27.332	27.540	27.329
<i>c</i>	2.2375	2.236	2.2359	2.2434	2.235
	2.2455	2.251	2.2516	2.2584	2.251
	2.2535	2.265	2.2673	2.2735	2.267

Для более наглядного представления о коэффициентах и их доверительных пределах построены графики (Рисунок 7).

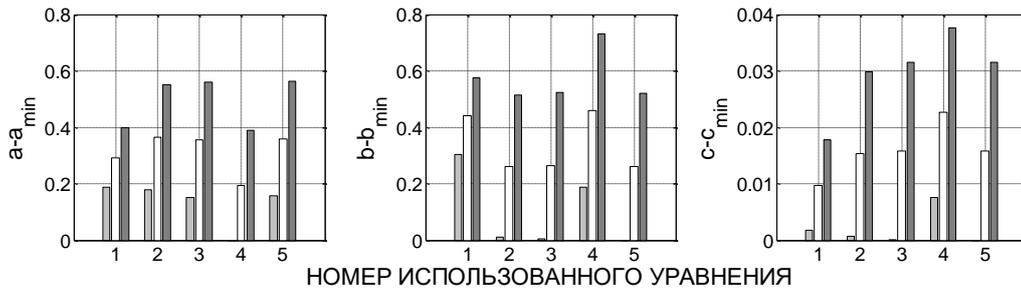


Рисунок 7. Сопоставление параметров уравнений:
1 – 8092; 2 – 8082, 3 – 8090; 4 – 8013; 5 – 8086; левый столбец – минимальный уровень доверительных пределов, правый столбец – максимальный уровень, средний столбец – рассчитанное значение параметра

На графиках из всех значений коэффициентов вычиталось их минимальное значение. Поэтому в ряде случаев изображено лишь два столбца. Отчетливо видно, что уравнение 8092 обеспечивает максимально стабильные значения параметров [9, 11, 13].

Пользуясь приведенными выше уравнениями можно воссоздать дифференциальное уравнение, характеризующее рассматриваемый процесс. В качестве примера рассмотрим уравнение 8013 по каталогу программы Table curve 2D.

$$M = a + \frac{b}{1 + (t/c)^d}. \quad (26)$$

Поскольку a – минимальное значение крутящего момента, а b – приращение крутящего момента (разница между максимальным и минимальным крутящими моментами), можно ввести степень вулканизации:

$$\beta = (M - a) / b. \quad (27)$$

Тогда:

$$\beta = \frac{1}{1 + (t/c)^d} = \frac{c^d}{c^d + t^d}. \quad (28)$$

$$1 - \beta = 1 - \frac{c^d}{c^d + t^d} = \frac{t^d}{c^d + t^d} \quad (29)$$

Берем производную по времени от степени вулканизации:

$$\frac{d\beta}{dt} = -\frac{c^d \cdot d \cdot t^{d-1}}{(c^d + t^d)^2} = -\frac{d}{t} \cdot \frac{c^d}{c^d + t^d} \cdot \frac{t^d}{c^d + t^d} = -\frac{d}{t} \cdot \beta \cdot (1 - \beta). \quad (30)$$

Выражаем t через β из уравнения (28):

$$\beta = \frac{1}{1+(t/c)^d}; \quad 1/\beta = 1+(t/c)^d; \quad \frac{1}{\beta} - 1 = \frac{1-\beta}{\beta} = \frac{t^d}{c^d}. \quad (31)$$

Отсюда:

$$t = c \cdot \beta^{-1/d} \cdot (1-\beta)^{1/d}; \quad \frac{1}{t} = \frac{1}{c} \cdot \beta^{1/d} \cdot (1-\beta)^{-1/d}. \quad (32)$$

Подставляя полученное выражение в (30), получим:

$$\frac{d\beta}{dt} = -\frac{d}{c} \cdot \beta^{1+1/d} \cdot (1-\beta)^{1-1/d} = -\frac{d}{c} \cdot \beta^{(d+1)/d} \cdot (1-\beta)^{(d-1)/d} = -\frac{d}{c} \cdot \beta^m \cdot (1-\beta)^n. \quad (33)$$

Т.к. $d < 0$, $n > 1$ и $m < 1$; $n+m=2$.

Таким образом, мы «синтезировали» дифференциальное уравнение, характеризующее процесс вулканизации, здесь $k = -d/c$ – константа скорости; $n = (d-1)/d$ – порядок реакции [9-11, 13].

2.1.1 Формализация дифференциальной кривой скорости процесса структурирования эластомерных композитов как функции распределения независимых случайных величин. Вычисление статистических моментов

Формально рассматривая кривые скорости как функции распределения независимых случайных величин, можно провести их статистический анализ, включающий расчет основных моментов (амплитудный анализ) [9-13, 55, 72].

В результате амплитудного анализа по кривой скорости можно определить четыре статистических момента распределения (M_x – математическое ожидание, D – дисперсию, S_k – коэффициент асимметрии, E_{xx} – коэффициент эксцесса), количественно характеризующих характер кривой скорости.

Поскольку этот момент для нормального распределения равен 3, удобно в качестве характеристики крутовершинности использовать коэффициент эксцесса $E = m_4/D^2 - 3$. Острове́ршинные кривые характеризуются $E > 0$. кривые с пологими вершинами и многовершинные кривые имеют $E < 0$.

Помимо определения вулканизационных характеристик по реометрической кривой целесообразно рассчитывать для оценки кривой скорости амплитуду (A), моду (M_0) и четыре перечисленных выше момента. [10, 13, 72].

Программный продукт Table curve 2D (SYSTAT SOFTWARE) предназначен для построения графиков в двумерной системе координат. Программа включает в себя огромное количество встроенных функций разного порядка сложности и мощный пакет для расчета основных статистических показателей [11]. Программа также позволяет реализовать методику расчета основных статистических моментов для функций распределения.

Амплитуду и моду кривой скорости можно получить при аппроксимации реограммы, пользуясь закладкой «Numeric Summary», где указываются координаты экстремумов производной.

Методика расчета основных статистических моментов содержит следующие этапы:

1. С помощью программы Table Curve 2D рассчитывают пять коэффициентов модели 8092 для реограммы состояния.

Для иллюстрации методики были взяты следующие конкретные значения этих параметров: $a=6.8012$ $b=29.7226$ $c=5.7603$ $d=0.2008$ $e=0.06056$.

2. Рассчитываются параметры соответствующей кривой скорости.
 $A'=6.1931$ $B=4.0245$ $C=0.2008$ $D=16.5114$.

3. Рассчитывается значение параметра A , обеспечивающего получение площади под кривой скорости, равной 1 (условие нормировки): $A=(1/0.2008)*(0.06056/1.0605)^{1.0605}=0,2390$.

4. В программе Table Curve 2D в меню «data» и далее «view function (X)». Ввести следующий текст:

$X*LGSTCPOWPK_(0.2390,4.0245,0.2008,16.5114)$

Пределы по X взять от 0 до 150.

5. Выбрать «Fn» и затем «Eval»,. Математическое ожидание равно 5.4699.

6. Ввести текст:

$(X-5.4699)^2*LGSTCPOWPK_(0.2390,4.0245,0.2008,16.5114)$

В результате расчетов получается дисперсия 14.230.

7. После замены в приведенной выше записи показателя степени на 3 или на 4, возможно рассчитать статистические моменты более высоких порядков. (Рисунок 8)

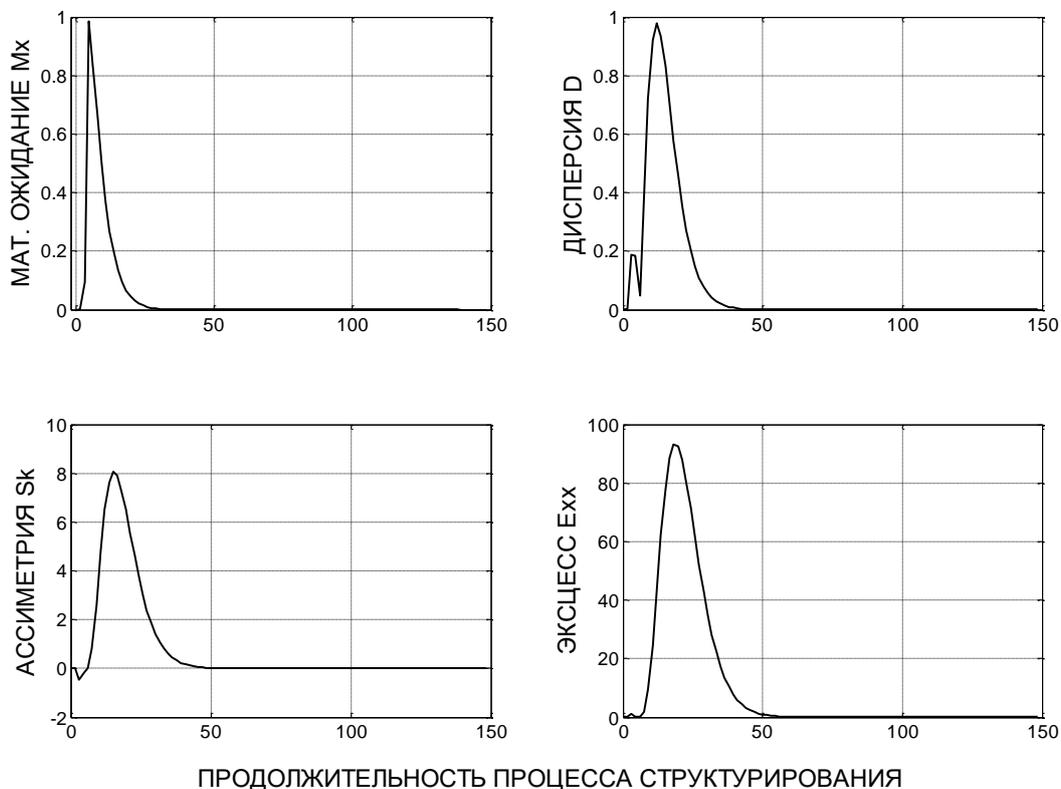


Рисунок 8. Устойчивые статистические характеристики процесса структурирования эластомерных композитов

На Рисунке 9, на примере одной из реограмм состояния, с использованием модели 8092 получены следующие кривые: а) собственно реограмма (зависимость крутящего момента (без учета участка падения крутящего момента) от продолжительности вулканизации; б) кривая скорости (зависимость производной dM/dt от времени); в) кривая «ускорения» (зависимость второй производной d^2M/dt^2 от времени) и г) кривая, характеризующая зависимость отношения значений второй производной к первой («ускорения» к скорости) от продолжительности вулканизации.

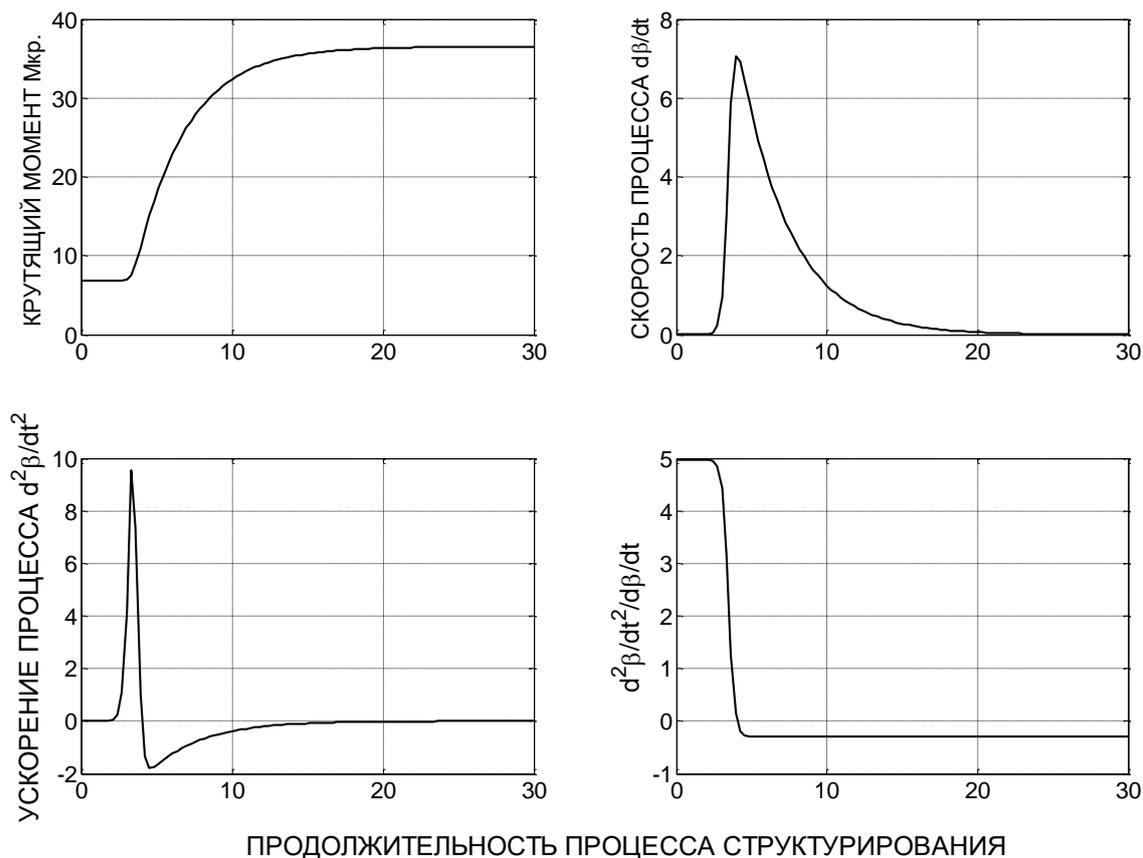


Рисунок 9 Кинетические кривые процесса структурирования многокомпонентного эластомерного композита

2.2. Семантическая модель химико-технологических процессов структурирования эластомерных композитов

Одним из важнейших направлений организации промышленного производства продукции из эластомерных композитов является обеспечение функций контроля и управления сложными химико-технологическими процессами смешения и структурирования. В настоящей работе решение этой проблемы рассматривается с точки зрения создания системы информационной поддержки управления процессами производства продукции из эластомерных композитов. Одной из основных задач подобной системы является своевременное обнаружение отклонений параметров технологических процессов для снижения образования брака, причем для их выявления на промежуточных стадиях производства необходима количественная оценка реограмм состояния процесса структурирования [9, 11, 13, 65].

Моделирование обеспечивает точное описание процесса, а в качестве эксперта выступает лицо, необходимое для поддержки принятия решения. Решаются обе интеллектуальные задачи, первая из них диагностика состояния технологического процесса и вторая, поддержка принятия решения. Для диагностики состояний и принятия решения содержится информационная база данных и база знаний. Современный этап разработки интеллектуальных систем управления в значительной степени ориентирован на разработку систем с интеллектуальным интерфейсом, гибридных систем искусственного интеллекта и моделей представления знаний. В работе из них используется семантическая сеть [56].

Представление знаний, основанное на семантических сетях, заключается в рассмотрении проблемной среды как совокупности объектов (сущностей) и связей (отношений) между ними. В данной работе проблемной областью является управление химико-технологическими процессами смешения и структурирования эластомерных композитов для повышения общей эффективности производства и обеспечения требуемого качества продукции.

Процесс структурирования представляет собой химический процесс превращения сырой пластичной резиновой смеси в эластичную резину, и технологический процесс получения изделия, резины, эластомерного композиционного материала путем закрепления требуемой формы для обеспечения требуемой функции изделия [14, 56, 57, 58].

На начальном этапе имеются каучук и различные ингредиенты. После развески приступают к процессу смешения. Процесс смешения проводят на вальцах или в резиносмесителе. В результате мы получаем полуфабрикат – сырую резиновую смесь – промежуточный продукт, которую в дальнейшем подвергают вулканизации (структурированию). На этапе сырой резиновой смеси контролируется равномерность смешения, проверяется состав смеси, оценивают ее вулканизационную способность.

В результате вулканизации получают готовое изделие. Точное соблюдение установленных параметров смеси необходимо для получения изделия с требуемым уровнем заданных свойств [55-58].

В процессах производства изделий из эластомеров контролируемые параметрами являются: температура T при смешении и вулканизации, давление P при прессовании, время τ обработки смеси на вальцах, а также время вулканизации (оптимум).

Температура смеси при смешении на вальцах измеряется игольчатой термопарой или термопарой с самопишущими приборами. Имеются также датчики температуры. Ее обычно контролируют, изменяя расход охлаждающей воды для вальцев при помощи регулировки вентиля. Возможно применение регулятора расхода охлаждающей воды [56-57].

Давление контролируется при применении масляного насоса.

В общем виде семантическую модель процесса структурирования можно свести в таблицу (Рисунок 10), где в качестве функций ($\Phi 1, \Phi 2, \Phi 3$) обозначены основные операции контроля производства, в блоке документов отражены основные источники и нормы контроля параметров процесса ($D1, D2, D3$), а также указаны исполнители ($I1, I2, I3$).

Функции	Документы	Исполнители
$\Phi 1$ – Определение параметров производства резиновой смеси.	$D1$ – Карта производства смеси	$I1$ - Вальцовщик $I2$ – специалист ЦЗЛ
$\Phi 2$ – Контроль качества смеси,	$D2$ – Паспорт смеси	$I3$ – специалист - технолог
$\Phi 3$ – Оценка и контроль вулканизационных характеристик смеси.	$D3$ – Паспорт смеси, данные виброреометрии	$I4$ – специалист отдела контроля качества готовой продукции
$\Phi 4$ – Контроль свойств готового изделия, выявление брака	$D4$ – Паспорт смеси, данные физико-механических испытаний	

Рисунок 10. Семантическая модель процесса структурирования многокомпонентных эластомерных композитов в табличной форме

Установление параметров изготовления резиновой смеси ($\Phi 1$) производится вальцовщиком ($I1$) по контрольным картам ($D1$), где содержатся необходимые значения параметров процесса.

Контроль качества полуфабриката (сырой смеси) ($\Phi 1$) проводится специалистами центральной заводской лаборатории (ЦЗЛ) ($I2$) завода-изготовителя по паспорту смеси ($D2$).

Процедура оценки вулканизационных характеристик ($\Phi 3$) проводится технологом ($I3$) по паспорту смеси и данным реометрических испытаний ($D3$).

Контроль получения кондиционного изделия (Ф4) – завершающая стадия – проводится специалистами отдела технического контроля качества готовой продукции (И4) по данным испытаний технических свойств изделия (Д4) [56].

2.3. Разработка логико-информационных моделей химико-технологических процессов структурирования эластомерных композитов

В настоящее время требования к качеству изделий из эластомеров все более ужесточаются. Важной задачей является контроль и управление процессом структурирования, необходимый для получения кондиционных изделий, повышения производительности и снижения образования брака [56].

Одним из важнейших направлений для повышения эффективности контроля и управления над технологическими процессами смешения и вулканизации является применение математических и информационных моделей для описания данных виброреометрии (т.е. анализ реометрических кривых). Так как на сегодня построение автоматизированных систем управления процессами смешения и структурирования эластомерных систем практически невозможно, то для принятия решений о качестве проведенного процесса используются реометрические кривые, поэтому реометр является неотъемлемой частью любой ЦЗЛ (Центральной заводской лаборатории), где и проводится оценка качества полученной эластомерной системы путем анализа проб резиновой смеси. Для снятия кривой обычно применяют различные реометры.

Построение информационных моделей для процессов смешения, структурирования и контроля производства изделий из эластомеров необходимо для объединения производственных процессов в единую информационную систему для принятия решений, и определения участка, на котором производится корректировка процессов.

Построение логико-информационной модели процесса структурирования

Для управления технологическим процессом структурирования эластомерных композитов используются экспертные решения, принимаемые на основе анализа реограмм. Для выбора управляющих параметров и оценки их

влияния на характеристики получаемых смесей были построены логико-информационные модели процесса.

Функционально-технологическая модель производства изделий из эластомеров отражает последовательное преобразование исходного сырья в готовый продукт действиями различных исполнителей на основе различных регламентирующих документов. [1, 3]

На начальном этапе производство изделий из эластомерных композитов рассматривается как единый, целостный процесс, сырье, полуфабрикат, готовая продукция, регламентирующие документы и исполнители не уточняются. Данный этап описывается диаграммой уровня А-0 (Рисунок 11).

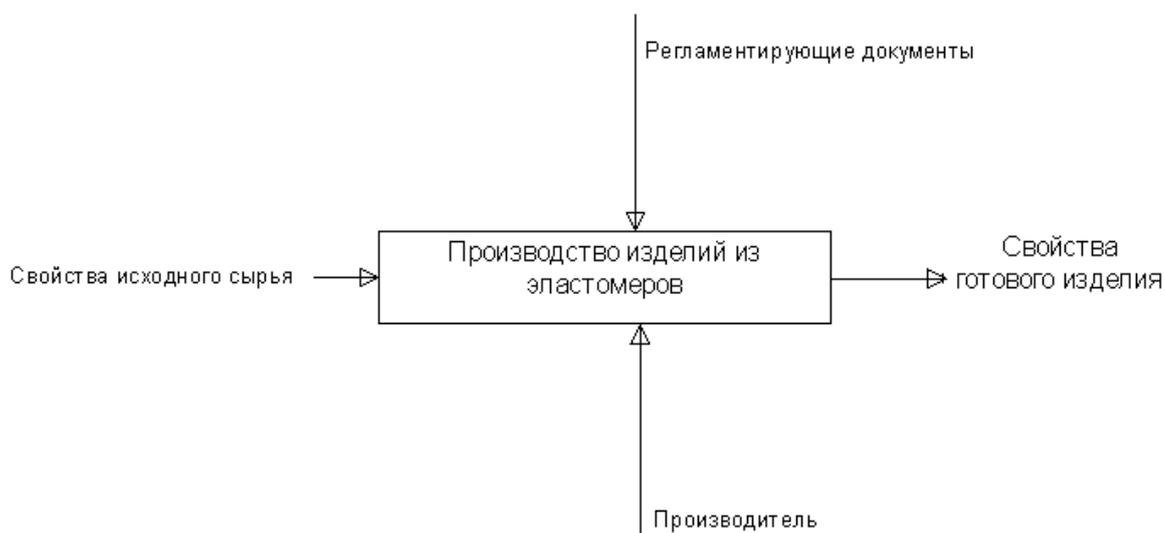


Рисунок 11. Общая схема производства эластомерного композиционного материала (резины)

Сырье, используемое для производства, описывается с помощью входных дуг. Полученная продукция (сырая резиновая смесь, полуфабрикат или готовое изделие – эластомерный композиционный материал, резина), описывается с помощью дуг «выход».

В дальнейшем на первом этапе декомпозиции рассмотрены пять основных технологических процессов, применяемых при изготовлении резиновой смеси: подготовка ингредиентов резиновой смеси, смешение в резиносмесителе, доработка смеси, оценка качества резиновой смеси и, собственно, хранение готовой смеси. (Рисунок 12.)

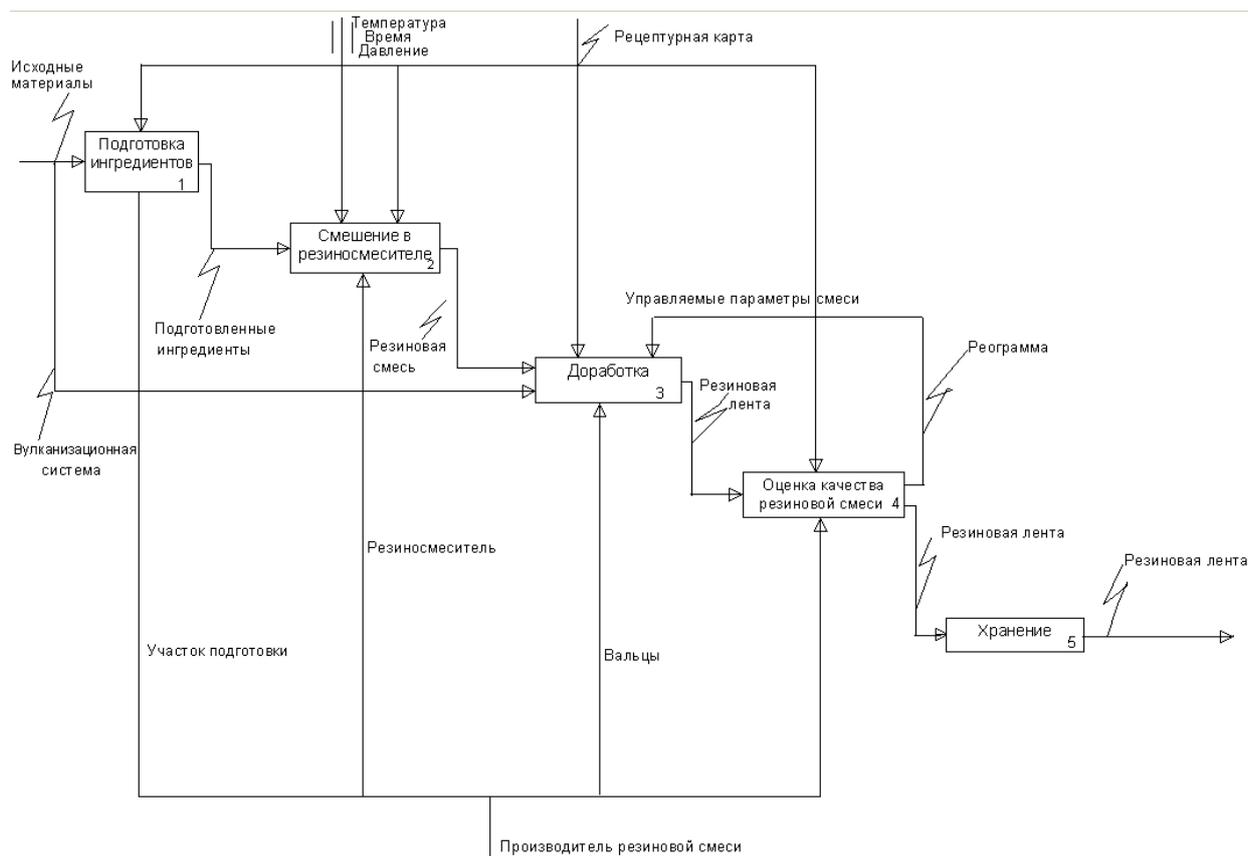


Рисунок 12. Диаграмма А0. Производство резиновой смеси

На этом этапе исполнители основных технологических процессов обозначены с помощью дуг «механизм». Из приведенной диаграммы видно, что каждый конкретный технологический процесс реализуется отдельным исполнителем.

Функциональный блок «Оценка качества резиновой смеси» был подвергнут дальнейшему разложению на 4 процесса: проверка смеси на пластичность, оценка вулканизационных свойств резиновой смеси, проверка однородности смешения и, собственно, технологический процесс вулканизации для получения готового изделия. (Рисунок 13).

Из приведенной функциональной диаграммы видно, что на вулканизацию попадает только резиновая смесь, отвечающая всем установленным критериям ее качества.

С помощью дуг «управление» описаны документы, регламентирующие основные технологические параметры рассматриваемых процессов. На данном этапе декомпозиции с помощью дуг «управление» описаны технологические агрегаты, с

помощью которых выполняется каждый из рассматриваемых процессов. Например, оценка вулканизационной способности и свойств резиновой смеси выполняется с помощью виброреометра Монсанто.

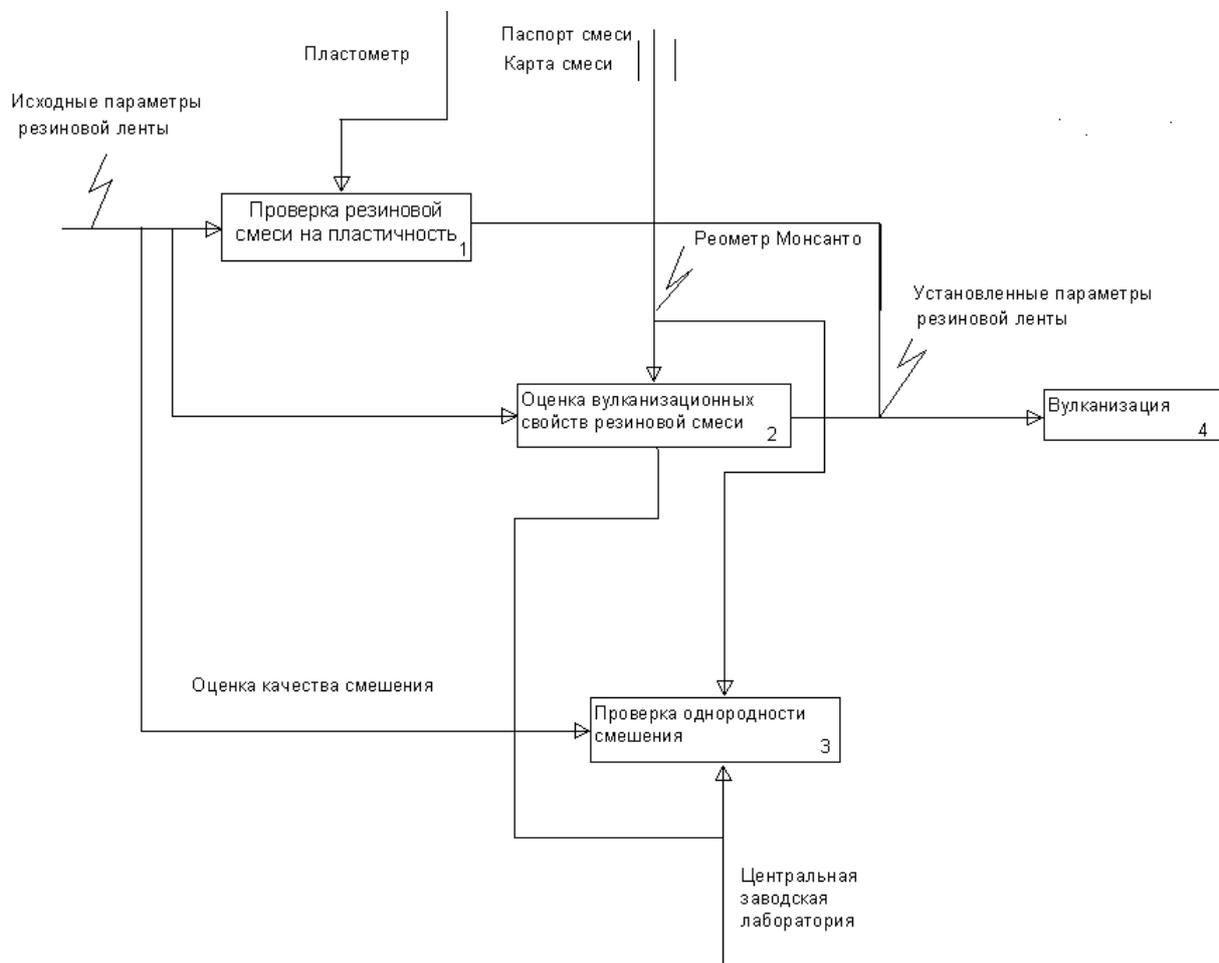


Рисунок 13. Диаграмма А14. Оценка качества резиновой смеси

Полученные при этом реограммы состояния используются для количественной оценки параметров индукционного периода вулканизации.

$$t_{c(90)} - t_{c(10)} = d \cdot \ln \left(\frac{10/9^{1/e} - 1}{10/9^{1/e} - 9^{1/e}} \right) + \frac{d}{e} \cdot \ln 9. \quad (34)$$

Величина e характеризует индукционный период процесса. Чем меньше параметр e , тем больше индукционный период.

Полученные реометрические данные позволяют принять соответствующие управленческие решения, а именно: смесь либо дорабатывается до необходимого уровня свойств, либо забраковывается и применяется для производства резиновых изделий другого класса.

Информационная поддержка контроля свойств резиновой смеси и ее доработки (при необходимости) приведена в виде функционального блока «Вулканизация».

Технологический процесс вулканизации состоит из 5 функциональных блоков, описан на диаграмме уровня А144 (Рисунок 14) и включает в себя процессы контроля свойств резиновой смеси, ее доработку (при необходимости), собственно процесс вулканизации, охлаждение продукта и контроль свойств готового изделия.

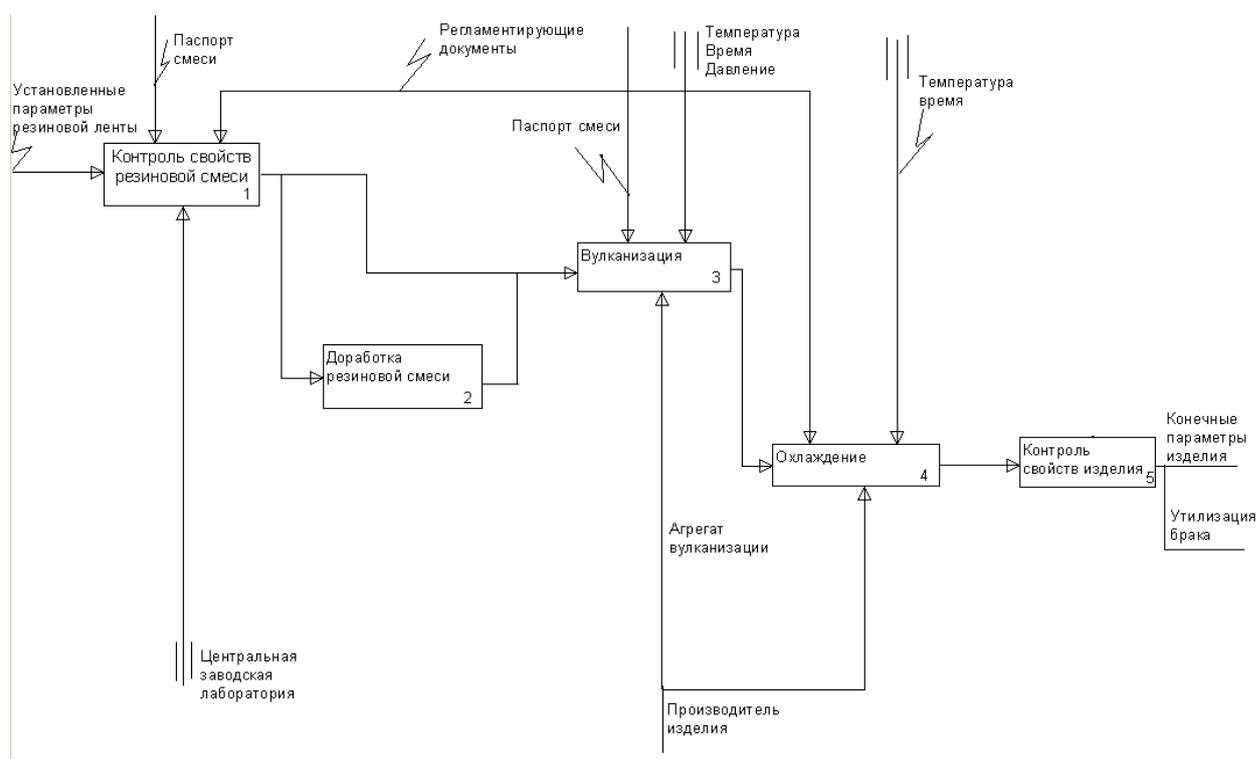


Рисунок 14. Диаграмма А144. Вулканизация резиновой смеси (получение ЭКМ)

С помощью дуг «управление» описаны основные параметры, влияющие на протекание технологического процесса, это температура, время обработки и давление. Регламентирующие документы представлены картой смеси и паспортом смеси.

Функциональный блок «Контроль свойств изделия» был подвергнут дальнейшей декомпозиции, в ходе которой были выделены и конкретизированы 5 процессов: внешний осмотр изделия на предмет явных дефектов, оценка физико-механических показателей, оценка твердости, оценка эластичности по упругому

отскоку, оценка истираемости. (Рисунок 15.) При соблюдении норм контроля мы получаем изделие с заданным комплексом свойств, при значительном отклонении – брак.

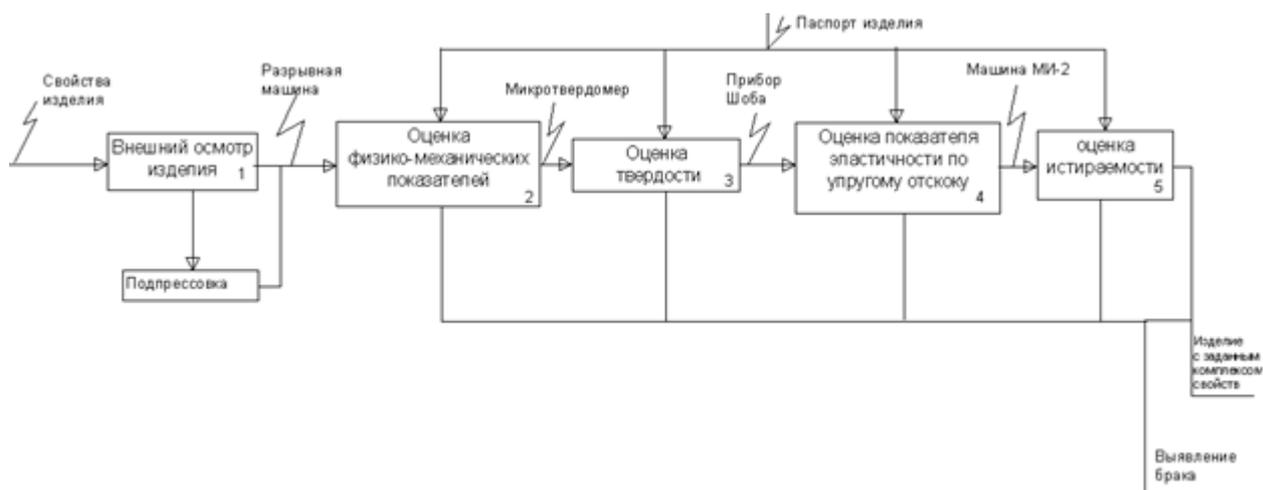


Рисунок 15. Диаграмма A1445. Контроль готового изделия и выявление брака

2.4. Выводы

1. На основе формализации дифференциальной кривой скорости процесса структурирования эластомерных композитов как функции распределения независимых случайных величин разработано математическое описание сложных химико-технологических процессов структурирования многокомпонентных эластомерных композитов.
2. Построена семантическая модель процесса структурирования многокомпонентных эластомерных композитов.
3. Построены логико-информационные модели для технологических процессов смешения и структурирования эластомерных композитов.
4. Проведена декомпозиция логико-информационной модели в блоках производства резиновой смеси, оценки качества резиновой смеси и вулканизации.
5. Показано, что при построении логико-информационной модели реограмма состояния рассматривается как инструмент контроля и управления технологическими процессами смешения и структурирования эластомерных композитов.
6. Показано, что функционально-технологическая модель производства изделий из эластомерных композитов позволяет формализовать детальный анализ последовательного преобразования ресурсов в готовую продукцию усилиями различных исполнителей на основе различных регламентирующих документов.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ УПРАВЛЕНИЮ ХИМИКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

3.1. Автоматизированные интеллектуальные системы управления химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов

Управление в процессах структурирования эластомерных композитов трактуется как направленное воздействие на химико-технологическую систему производства продукции из эластомерных композитов, которое обеспечивает поддержание оптимальных параметров данного процесса [65–67, 89].

На сегодняшний день в современном представлении автоматизированная система управления сложными химико-технологическими процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов условно состоит из двух частей: 1) классическая автоматическая система управления процессом на основе применения регуляторов и 2) управление процессами структурирования на основе экспертных систем.

Задача управления технологическими процессами структурирования эластомерных композитов – поддержание на требуемом уровне значений основных технологических величин. Возмущающие воздействия, приводящие к отклонению показателей процесса от заданных, носят рецептурно-технологический характер [57].

В процессах смешения многокомпонентных эластомерных композитов контролируется порядок введения ингредиентов резиновой смеси, ее температура (путем замера игольчатой термопарой), а также продолжительность смешения в минутах. Конечный продукт данной подсистемы проверяется на качество смешения путем отбора проб из различных участков смеси и сравнения полученных результатов с паспортом стандартной смеси [15, 16].

В системе управления химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов контролируемыми параметрами являются температура T процесса, давление P и оптимальное время структурирования τ_{90} . Поддержание температуры процесса осуществляется при помощи регулятора температуры позиционного типа (характеристика приведена на Рисунке 16). Применение регулятора данного типа объясняется его сравнительной простотой. Давление поддерживается при помощи масляного насоса с использованием пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора. (Рисунок 17) Применение ПИД – регулятора обусловлено быстротой приведения управляемого параметра процесса к заданному значению [75].

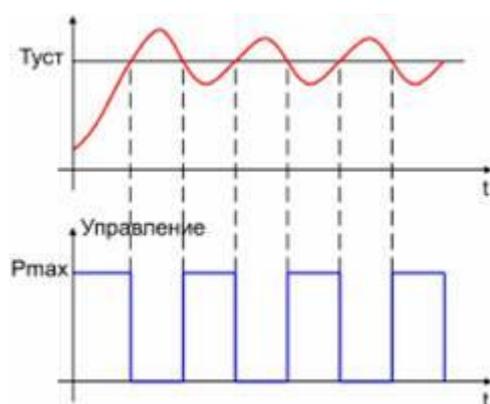


Рисунок 16. Временная зависимость для позиционного регулятора

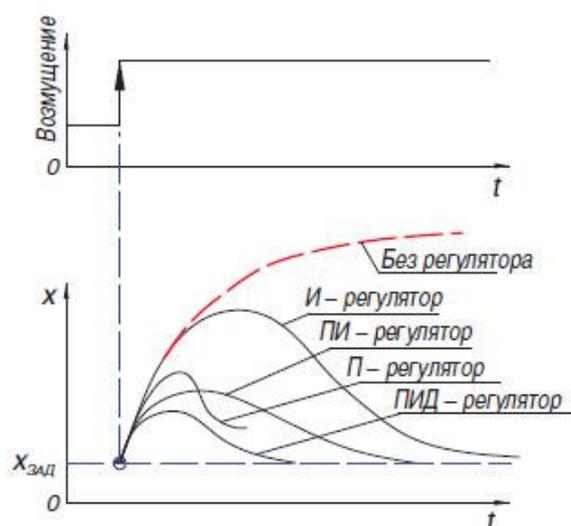


Рисунок 17. Временные зависимости для регуляторов различных типов

Предложена автоматизированная схема управления процессом структурирования эластомерных композитов на основе анализа по косвенным показателям (Рисунок 18).

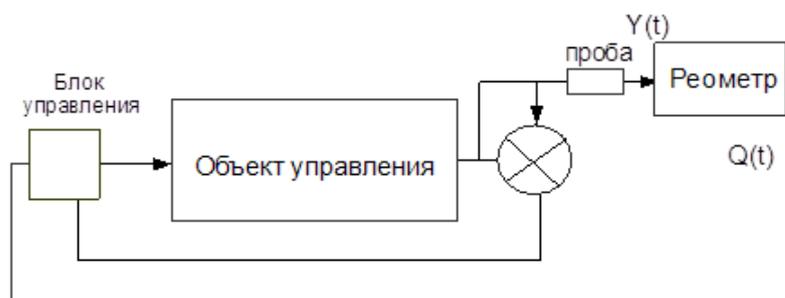


Рисунок 18. Схема управления процессами структурирования эластомерных композитов

Предложена модель системы управления процессами структурирования эластомерных композитов на основе данных виброреометрии, представляющая собой пример использования системы управления по косвенным показателям. На основе анализа промежуточных проб принимается решение о корректировке процесса, использовании смеси для производства изделий другого класса, или о забраковке и утилизации смеси [65, 66, 71].

Для накопления, обработки и систематизации хранения и передачи реометрической информации, а также для обеспечения поддержки принятия решений по контролю и управлению процессом производства изделий из эластомеров создана информационная база данных реограмм состояния.

Для построения базы данных реограмм состояния были построены логико-информационная, физическая и реляционная модели данных. При проектировании структуры базы данных была построена реляционная модель данных в нотации IDEF1X (Рисунок 19)

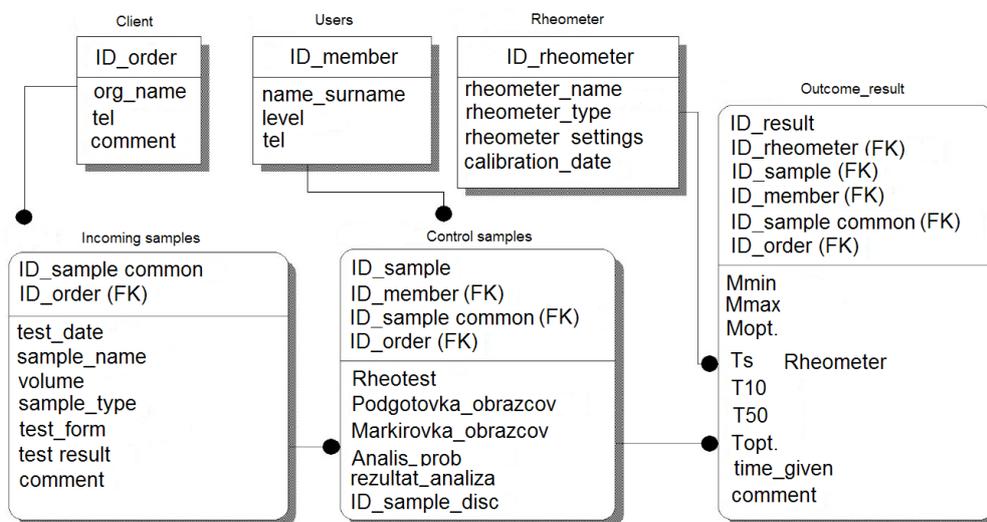


Рисунок 19. IDEF1X (ER) модель ИБД реографической информации

Модель включает в себя схему Основного хранилища данных (о пробах, контрольных образцах и результатах измерений), дополненную справочными таблицами.

Описание таблиц БД:

client – содержит сведения о заказчике;

users – содержит сведения о пользователях, которые работают с системой, и ведет протоколирование действий с БД;

Rheometer – таблица, содержащая сведения о характеристиках прибора на тот или иной момент времени. Позволяет вести статистику испытаний, а также дает представление о типах и параметрах используемых для испытаний образцов композитов виброреометров;

Incoming samples – таблица характеристик входящих образцов, содержит данные о времени и месте отбора, количестве и виде пробы, времени регистрации, виды необходимых испытаний, реквизиты выходного протокола;

Control samples – сведения об измеряемых образцах, приготовленных тем или иным методом из пробы. Содержит данные по пробоподготовке, вносимых метках, времени начала анализа, вид анализа, номере образца;

Outcome result – сводная таблица результатов измерений, содержит основные вулканизационные характеристики эластомерных композитов.

Также был обоснован выбор СУБД в качестве ИБД MS Access для Windows.

Ms Access – реляционная система управления базами данных (СУБД) корпорации Microsoft. Имеет широкий спектр функций, включая связанные запросы, связь с внешними таблицами и базами данных. Обладает встроенной совместимостью и возможностью импорта данных из таблиц Microsoft Excel.

В отличие от остальных баз данных по виброреометрии, созданная информационная база данных является типовой, она может быть установлена в любой заводской лаборатории и на учебно-научных тренажерах любого технического вуза. Она работает на различных аппаратных платформах и поддерживает различные аппаратные конфигурации, начиная с устаревших процессоров и заканчивая современными ЭВМ.

На сегодняшний день принятие решений по управлению процессами структурирования эластомерных композитов на основе анализа реограмм состояния выполняется вручную в лаборатории. В работе предлагается, используя разработанные в первой и второй главе математические и логико-

информационные модели, реализовать вторую часть управления в виде интеллектуальной системы управления на основе продукционных моделей.

3.2. Сравнительный анализ продукционных и когнитивных моделей управления химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов

Интеллектуальная система (ИС, англ. intelligent system) — это техническая или программная система, способная решать задачи, традиционно считающиеся творческими, принадлежащие конкретной предметной области, знания о которой хранятся в памяти такой системы. Структура интеллектуальной системы включает три основных блока – базу знаний, механизм вывода решений и интеллектуальный интерфейс [89].

Интеллектуальные системы изучаются группой наук, объединяемых под названием «искусственный интеллект».

В технологиях принятия решений интеллектуальная система — это информационно-вычислительная система с интеллектуальной поддержкой, решающая задачи без участия человека — лица, принимающего решение (ЛПР), в отличие от интеллектуализированной системы, в которой оператор присутствует [89].

Искусственный интеллект — научная основа создания экспертных систем в химической технологии.

В настоящее время методы решение задач управления при помощи методов искусственного интеллекта – одна из бурно развивающихся областей науки, которая разрабатывает методы и специальные программно-технические средства поиска решений интеллектуальных творческих, или математически неформализованных задач [89].

В настоящее время широко применяются когнитивные технологии систем принятия решений. Основные представления о структуре и архитектуре когнитивной модели поддержки принятия решений рассмотрены в работах А.В. Бернштейна, А.П. Кулешова и А.А. Харламова.

В работе (78) проведен обзор методов, алгоритмов и программ, моделирующих познавательные способности человеческого мозга для решения конкретных прикладных задач в компьютерных системах проектирования и анализа данных в условиях нечетких входных данных и взаимосвязей, основанных на синергии математических методов, информационных технологий и знаний из предметной области, объединенных общим понятием «когнитивные технологии».

Когнитивная информационная модель представляет собой программно-информационный комплекс, размещенный в информационно-аналитической среде органа управления и предназначенный для обеспечения «добывания управленческих знаний», которые обеспечивают процесс интеллектуального анализа ситуации в конкретных предметных отраслях [77].

Когнитивные технологии в информатике в современном понимании этого слова – это совокупность методов, алгоритмов и программ, моделирующих познавательные способности человеческого мозга для решения конкретных прикладных задач – распознавания образов (речи, сигналов, изображений, сцен и т.д.), выявления и идентификации закономерностей в массивах данных, решения задач компьютерного проектирования сложных систем, систем поддержки принятия решений в условиях нечетких входных данных и взаимосвязей и т.д. [76]. Задача соединения вычислительных возможностей компьютера с когнитивными способностями человеческого мозга лежит в основе современных когнитивных технологий моделирования [76-78].

В работах (76), (77), посвященных разработке систем информационного обеспечения с применением методов когнитивного моделирования предложена следующая схема построения баз знаний по молекулярной биологии (Рисунок 20):

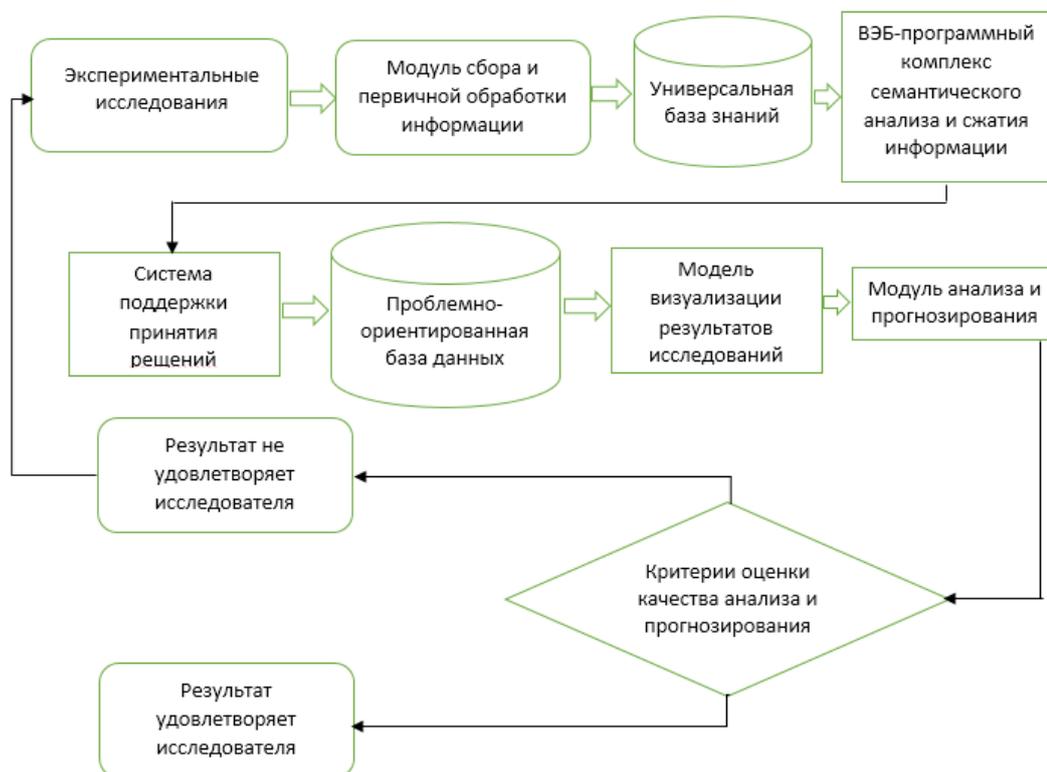


Рисунок 20. Общая схема когнитивного моделирования информационного обеспечения систем построения молекулярно-биологических баз знаний

Однако, для системы принятия решений по управлению сложными химико-технологическими процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов решение задачи построения когнитивной модели управления представляется достаточно сложной и трудоемкой. Гораздо более простой задачей представляется описание системы продукционных правил, которые используются для управления химико-технологическими процессами структурирования сложных многокомпонентных эластомерных композитов.

Описание интеллектуальных систем управления наиболее полно представлено в работах В.П. Мешалкина и А.Е. Краснова. Основная идеология продукций и построение системы продукционных правил подробно изложены в работах И.О. Темкина [79-80, 89-95].

3.3 Архитектура экспертных систем принятия решений по управлению химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов

В начале 80-х гг. XX в. в исследованиях по созданию искусственного интеллекта сформировалось новое самостоятельное направление, получившее название экспертных систем. Цель этих новых исследований по экспертным системам состоит в разработке специальных программ, предназначенных для решения особых видов задач [81-84]. К этому особому виду задач могут быть отнесены задачи из абсолютно любой предметной области. Главное, что отличает их от задач обычных, – это то, что человеку-эксперту решить их представляется очень сложным заданием. Тогда и была разработана первая так называемая экспертная система (где в роли эксперта выступал уже не человек, а машина), причем экспертная система получает результаты, не уступающие по качеству и эффективности решениям, получаемым обычным человеком – экспертом. Результаты работы экспертных систем могут быть объяснены пользователю на очень высоком уровне. Данное качество экспертных систем обеспечивается их способностью рассуждать о собственных знаниях и выводах. Экспертные системы вполне могут пополнять собственные знания в процессе взаимодействия с экспертом. Таким образом, их можно с полной уверенностью ставить в один ряд с вполне оформившимся искусственным интеллектом [82, 84, 89].

Исследователи в области экспертных систем для названия своей дисциплины часто используют также уже упоминавшийся ранее термин «инженерия знаний», введенный немецким ученым Е. Фейгенбаумом как «привнесение принципов и инструментария исследований из области искусственного интеллекта в решение трудных прикладных проблем, требующих знаний экспертов».

Однако коммерческие успехи к фирмам-разработчикам пришла не сразу. На протяжении четверти века в период с 1960 по 1985 гг. успехи искусственного интеллекта касались в основном исследовательских разработок. Тем не менее,

начиная примерно с 1985 г., а в массовом масштабе с 1987 по 1990 гг. экспертные системы стали активно использоваться в коммерческих приложениях [81, 89].

Основные преимущества экспертных систем довольно велики и состоят в следующем:

1) технология экспертных систем существенно расширяет круг практически значимых задач, решаемых на персональных компьютерах, решение которых приносит значительный экономический эффект и существенно упрощает все связанные с ними процессы;

2) технология экспертных систем является одним из самых важных средств в решении глобальных проблем традиционного программирования, таких как продолжительность, качество и, следовательно, высокая стоимость разработки сложных приложений, вследствие которой значительно снижался экономический эффект;

3) имеется высокая стоимость эксплуатации и обслуживания сложных систем, которая зачастую в несколько раз превосходит стоимость самой разработки, а также низкий уровень повторной используемости программ и т. п.;

4) объединение технологии экспертных систем с технологией традиционного программирования добавляет новые качества к программным продуктам за счет, во-первых, обеспечения динамичной модификации приложений рядовым пользователем, а не программистом; во-вторых, большей «прозрачности» приложения, лучшей графики, интерфейса и взаимодействия экспертных систем [84].

В общем случае экспертные системы предназначены для так называемых неформализованных задач, т. е. экспертные системы не отвергают и не заменяют традиционного подхода к разработке программ, ориентированного на решение формализованных задач, но дополняют их, тем самым значительно расширяя возможности. Именно этого и не может сделать простой человек-эксперт [80, 81].

Экспертные системы главным образом основаны на эвристическом поиске решения, а не на исполнении известного алгоритма.

В этом одно из главных преимуществ технологии экспертных систем перед традиционным подходом к разработке программ. Именно это и позволяет им так хорошо справляться с поставленными перед ними задачами.

Технология экспертных систем используется для решения самых различных задач. Перечислим основные из подобных задач.

1. Интерпретация.
2. Прогнозирование.
3. Диагностика различных приборов.
4. Планирование различных событий.
5. Проектирование.
6. Контроль.
7. Управление.

Структура экспертных систем

Разработка экспертных систем имеет ряд существенных отличий от разработки обычного программного продукта. Опыт создания экспертных систем показал, что использование при их разработке методологии, принятой в традиционном программировании, либо сильно увеличивает количество времени, затраченного на создание экспертных систем, либо вовсе приводит к отрицательному результату [86].

Стандартная статическая экспертная система состоит из следующих основных компонентов:

- 1) рабочей памяти, называемой также базой данных;
- 2) базы знаний;
- 3) решателя, называемого также интерпретатором;
- 4) компонентов приобретения знаний;
- 5) объяснительного компонента;
- 6) диалогового компонента.

Рассмотрим теперь каждый компонент более подробно.

Рабочая память (по абсолютной аналогии с рабочей, т. е. оперативной памятью компьютера) предназначена для получения и хранения исходных и промежуточных данных решаемой в текущий момент задачи.

База знаний предназначена для хранения долгосрочных данных, описывающих конкретную предметную область, и правил, описывающих рациональное преобразование данных этой области решаемой задачи [86].

Решатель, называемый также интерпретатором, функционирует следующим образом: используя исходные данные из рабочей памяти и долгосрочные данные из базы знаний, он формирует правила, применение которых к исходным данным приводит к решению задачи.

Компонент приобретения знаний автоматизирует процесс заполнения экспертной системы знаниями эксперта, т. е. именно этот компонент обеспечивает базу знаний всей необходимой информацией из данной конкретной предметной области [85-86].

Компонент объяснений разъясняет, как система получила решение данной задачи, или почему она это решение не получила и какие знания она при этом использовала. Данный компонент является очень важным во всей экспертной системе, поскольку он значительно облегчает тестирование системы экспертом, а также повышает доверие пользователя к полученному результату и, следовательно, ускоряет процесс разработок. [79-80, 89-95].

Продукционная модель знаний

По своей сути продукционные модели знаний близки к логическим моделям, что позволяет организовать весьма эффективные процедуры логического вывода данных [86].

Несомненно, продукционная модель знаний является одним из главных средств представления знаний в системах искусственного интеллекта [80-83].

Традиционная продукционная модель знаний включает в себя следующие базовые компоненты:

1) набор правил (или продукций), представляющих базу знаний продукционной системы;

2) рабочую память, в которой хранятся исходные факты, а также факты, выведенные из исходных фактов при помощи механизма логического вывода;

3) сам механизм логического вывода, позволяющий из имеющихся фактов, согласно имеющимся правилам вывода, выводить новые факты.

Каждое правило, представляющее базу знаний продукционной системы, содержит условную и заключительную части. В условной части правила находится либо одиночный факт, либо несколько фактов, соединенных конъюнкцией. В заключительной части правила находятся факты, которыми необходимо пополнить рабочую память, если условная часть правила является истинной.

Продукционная модель экспертных систем

В продукционных системах знания представлены в форме множественного правила, на основе которых формируются выводы, которые должны быть сделаны (или не сделаны) в разных ситуациях. Выводы делаются на основе методов прямого или обратного логического вывода. Зависимости от метода логического вывода различают два вида продукционных систем: системы с прямым логическим выводом и системы с обратным логическим выводом [84-86].

Широкое применение систем, основанных на продукционных правилах, обусловлено наличием в них следующих особенностей:

- Модульная организация. Благодаря модульной организации упрощается представления знаний и расширение экспертной системы, наращивая ее возможности шаг за шагом.

- Наличие средств объяснения. Продукционные экспертные системы с помощью правил позволяют легко создавать средства объяснения. Средства объяснения отслеживают последовательность активированных правил и, на этой основе, дают возможность восстановить ход рассуждений, которые привели к определенному выводу.

- Наличие аналогии с познавательным процессом человека. Согласно результатам, полученным Ньюэллом и Саймоном, правила являются естественным способом моделирования процесса решения задач человеком. Поэтому, в процессе выявления экспертных знаний, не возникают лишние сложности в объяснении экспертам структуры представления знаний, поскольку применяется простое их представление в виде правил IF-THEN [86].

Структура экспертной системы

Общую структуру экспертной системы, основанной на правилах, можно представить в виде схемы, изображенной на Рисунке 21.

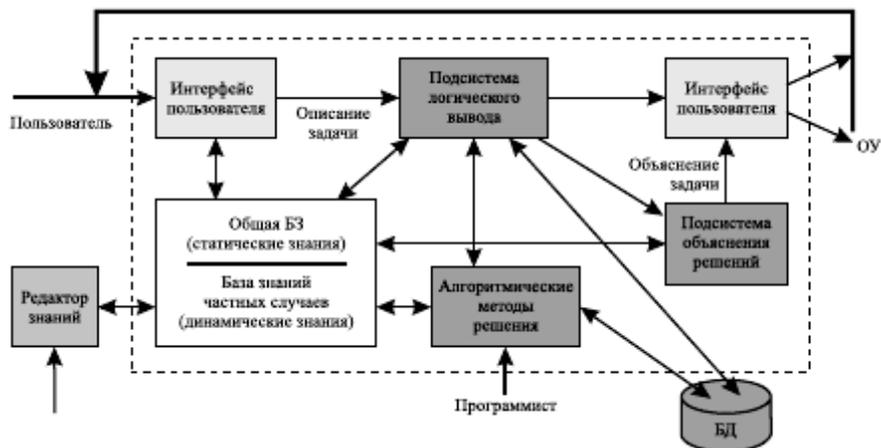


Рисунок 21. Общая структура экспертной системы, основанной на правилах

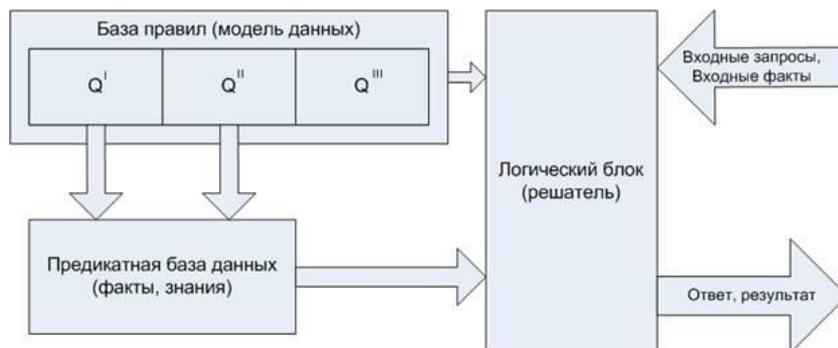


Рисунок 22. Структура базы знаний, использующая логическую и продукционную модели

Приведенная структура наглядно иллюстрирует основные аспекты продукционной модели экспертных систем, поэтому рассмотрим подробно сущность и назначение ее компонентов.

Интерфейс. Интерфейс - это механизм, с помощью которого происходит общение пользователя с экспертной системой. В зависимости от назначения системы, интерфейс пользователя может использовать простой текстовый дисплей или сложный растровый дисплей с высоким разрешением [79-80, 90-95].

Средство получения знаний. Средство получения знаний представляет собой автоматизированный способ, который позволяет пользователю вводить знания в систему, не применяя явного кодирования знаний с помощью инженера по знаниям. Это инструментальное средство, в некоторых экспертных системах способен обучаться, осуществляя автоматическое формирование правил на основании примеров.

База знаний. Системы, соответствующие производственные модели, сохраняющие знания, необходимые для решения задач, в некоторой проблемной области в базе знаний. Базу знаний экспертной системы, в которой знания закодированы в форме правил, называют продукционной памятью. В ней правила выраженные в формате продукционного псевдокода IF-THEN.

Машина логического вывода. Машина логического вывода является программным компонентом, который определяет антецеденты правил (если таковые имеются), которые выполняются согласно фактам. Для этого машина логического вывода выполняет следующие действия:

- выбирает правила, которым соответствуют факты;
- распределяет выбранные правила по приоритетам;
- выполняет правило с высшим приоритетом.

Рабочая память. Рабочая память предназначена для размещения фактов, касающихся текущего состояния объекта исследований. Факты, находящиеся в рабочей памяти, не взаимодействуют друг с другом, в отличие от правил, хранящихся в базе знаний. Если в рабочей памяти есть факт, который соответствует условной части правила, машина логического вывода размещает это правило в рабочем списке правил [79-80, 89-95].

Рабочий список правил. Рабочий список правил представляет собой созданный машиной логического вывода и расположен по приоритетам список

правил, шаблоны которых соответствуют фактам, находящимся в рабочей памяти. Правило, все шаблоны которого распознанные как соответствующие, называется активизированным или реализованным. В рабочем списке правил может одновременно присутствовать несколько активизированных правил. В этом случае машина логического вывода должна выбрать, в зависимости от приоритета, одно из правил для запуска действия [79-80, 89-95].

Средство объяснения. Главной особенностью экспертной системы является предусмотренное в ней средство объяснения, который отображает информацию о том, как система пришла определенному выводу.

Экспертная система принятия решений по управлению химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов

При исследовании технологических процессов смешения и структурирования эластомерных систем с точки зрения экспертной системы управления на первый план выходят задачи интерпретации, управления и контроля процессов на основе анализа реографической информации [16, 55, 58, 65].

Экспертная система управления процессами структурирования эластомерных композитов основана на применении продукционной модели. Экспертные решения применяются на основе сформированного блока продукционных правил применительно к процессу структурирования. Анализ отклонения технологических показателей от стандартных возможен благодаря применению базы данных стандартных реограмм состояния многокомпонентных эластомерных композитов [65, 68, 71, 79-80, 90-95].

Была проведена систематизация знаний об объекте управления в виде продукционной базы знаний. Такая форма представления знаний характерна своей наглядностью, высокой модульностью, легкостью внесения дополнений. Каждое правило БЗ записывается в виде «Если ..., то ...»: посылка (часть «если») соответствует условию, а заключение (часть «то») – выводу.

Для построения правил вышеупомянутой структуры необходимо использовать математический аппарат нечетких множеств. Так, каждой

координате необходимо представить лингвистические переменные с характерными термами, например «высокий», «средний», ... «низкий», «очень низкий». Это означает, что можно сформулировать БЗ о влиянии независимых координат $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ на значение зависимой координаты y в виде совокупности логических высказываний типа:

$$\begin{array}{l} \text{ЕСЛИ } (x_1 = a_{1j1}) \text{ И } (x_2 = a_{2j1}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n = a_{nj1}) \\ \text{ИЛИ } (x_1 = a_{1j2}) \text{ И } (x_2 = a_{2j2}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n = a_{nj2}) \dots \\ \text{ИЛИ } (x_1 = a_{1jk}) \text{ И } (x_2 = a_{2jk}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n = a_{njk}) \\ \text{ТО } y = d_j, \quad j \in [1, m], \end{array}$$

где a_{ijp} – терм, которым оценивается переменная x_i в строчке с номером j_p ($p \in [1, kj]$); kj – количество строчек-конъюнкций, у которых выход оценивается термом d_j ; m – количество термов, используемых для лингвистической оценки выходного параметра y [85].

Далее в тексте диссертации приведен фрагмент системы продукционных правил для управления химико-технологическими процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов:

Таблица 6. Основные компоненты системы продукционных правил для управления химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов

Параметр	Название
P	Пластичность смеси
P*	Пластичность смеси по паспорту
S	Мягкость резиновой смеси
S*	Мягкость резиновой смеси по паспорту смеси
η	Вязкость резиновой смеси
η^*	Вязкость резиновой смеси по паспорту смеси
M_{\min}	Минимальный крутящий момент
M^*_{\min}	Минимальный крутящий момент, по паспорту смеси
M_{\max}	Максимальный крутящий момент
M^*_{\max}	Максимальный крутящий момент, по паспорту смеси
T_s	Время начала вулканизации
T_s^*	Время начала вулканизации, по паспорту смеси
T_{10}	Время подвулканизации
T_{10}^*	Время подвулканизации, по паспорту смеси
T_{50}	Время 50%-го структурирования
T_{50}^*	Время 50%-го структурирования по паспорту
T_{90}	Оптимальное время структурирования

T_{90}^*	Оптимальное время структурирования по паспорту смеси
R_v	Скорость процесса структурирования
R_v	Скорость процесса структурирования, по паспорту
ρ	Плотность резиновой смеси
ρ^*	Плотность резиновой смеси по паспорту смеси
V_1	Содержание наполнителя
V_2	Содержание мягчителя
V_3	Содержание структурирующего агента
V_4	Содержание ускорителя
V_5	Температура смеси
V_6	Время обработки
V_7	Давление структурирования
N1	Увеличить
N2	Уменьшить

If $P < P^*$, then N₂, V₂.

If $P > P^*$, then N₁, V₁.

If $P < P^*$; $S < S^*$, then N₂, V₂.

If $P > P^*$; $S > S^*$, then N₁, V₁.

If $P < P^*$; $\eta < \eta^*$, then N₁, V₁.

If $P > P^*$; $\eta < \eta^*$, then N₁, V₁.

If $P > P^*$; $\eta > \eta^*$, then N₂, V₂.

If $\eta < \eta^*$, then N₁, V₁, V₄.

If $\eta > \eta^*$, then N₂, V₂.

If $\eta < \eta^*$; $M_{\min} < M_{\min}^*$, then N₁, V₁, V₄.

If $\eta > \eta^*$; $M_{\min} > M_{\min}^*$, then N₂, V₁, V₄.

If $\eta < \eta^*$; $M_{\min} > M_{\min}^*$, then N₂, V₃.

If $\eta > \eta^*$; $M_{\min} < M_{\min}^*$, then N₁, V₃.

If $\eta > \eta^*$; $M_{\max} < M_{\max}^*$, then N₁, V₆.

If $\eta > \eta^*$; $M_{\max} > M_{\max}^*$, then N₂, V₆.

If $\eta > \eta^*$; $M_{\max} > M_{\max}^*$, then N₁, V₅.

If $T_s < T_s^*$, then N₁, V₃, V₄.

If $T_s > T_s^*$, then N₂, V₃, V₄.

If $T_s < T_s^*$; $T_{90} < T_{90}^*$, then N₁, V₃, V₄.

If $T_s > T_s^*$; $T_{90} > T_{90}^*$, then N₂, V₃, V₄.

If $R_v < R_v^*$, then N₁, V₁, V₃, V₄.

If $R_v > R_v^*$, then N₂, V₁, V₃, V₄.

If $p < p^*$, then N₁, V₁.

If $p > p^*$, then N₂, V₁.

Рисунок 23. Фрагмент системы продукционных правил для управления сложными химико-технологическими процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов

На Рисунке 24 приведено дерево продукций для анализа процесса структурирования эластомерных композитов при отклонении значений крутящего момента с точки зрения его корректировки путем варьирования рецептурно-технологических факторов.

На основе анализа технологических процессов смешения и структурирования эластомерных композитов было построено информационное обеспечение системы управления химико-технологическими процессами смешения и структурирования многокомпонентных эластомерных композитов (архитектура данной системы приведена на рисунке 25.)

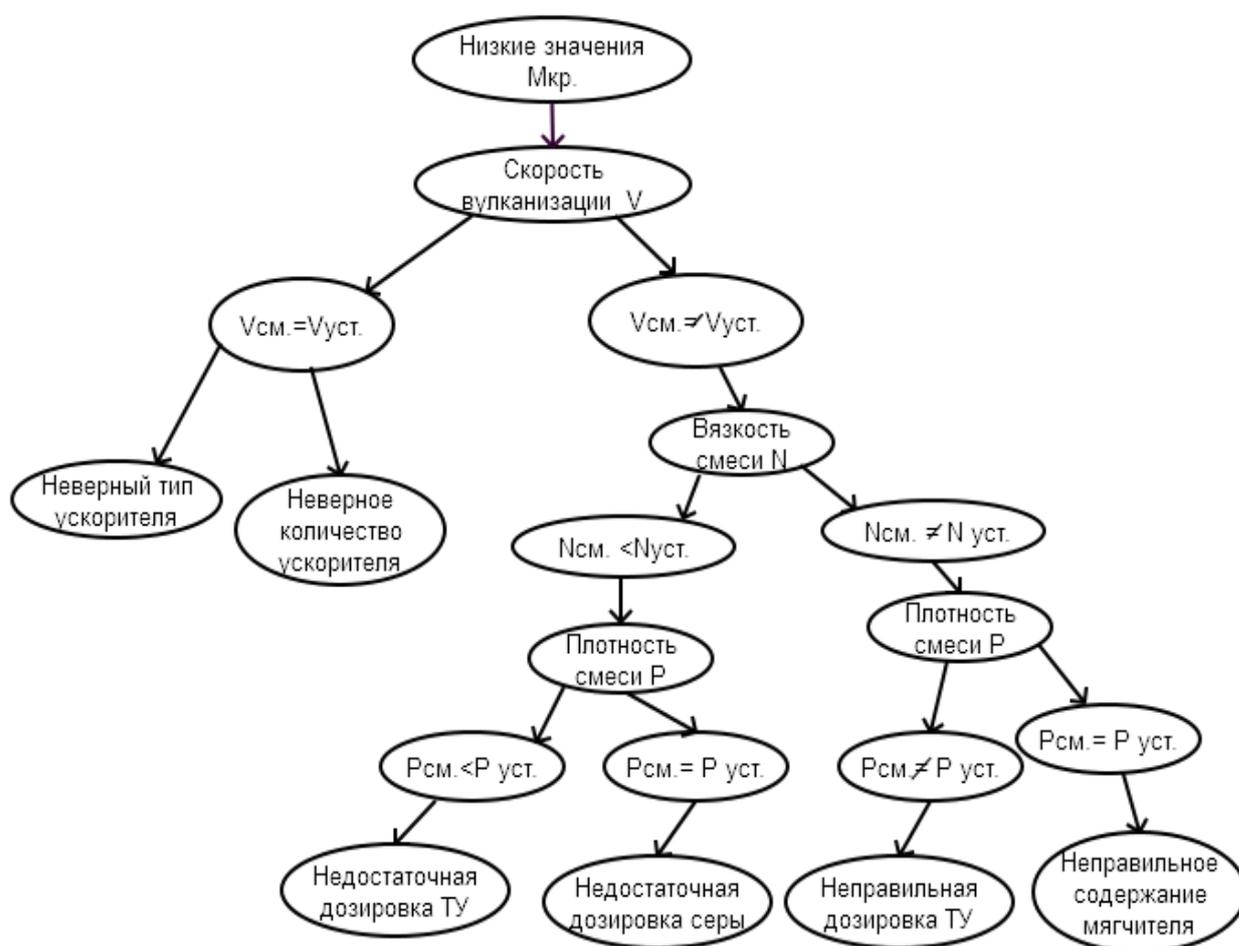


Рисунок 24. Дерево продукций для анализа процесса структурирования эластомерных композитов

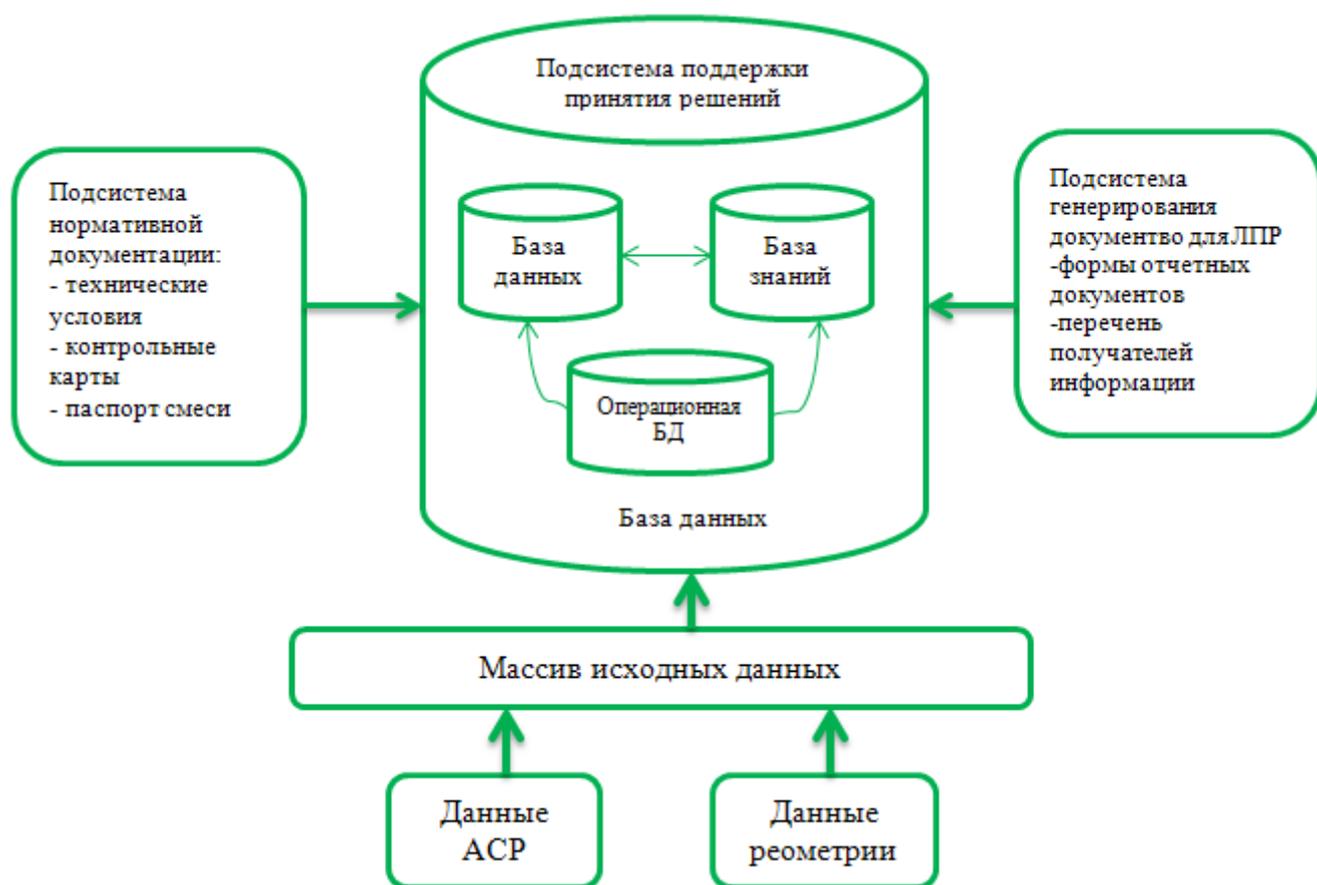


Рисунок 25. Архитектура интегрированной информационной системы управления химико-технологическими процессами смешения и структурирования эластомерных композитов

Данные виброреометрических испытаний являются решающими факторами для принятия решений по оперативному контролю и управлению сложными химико-технологическими процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов. Данные автоматической системы регулирования представляют собой часть технологической информации по этим процессам.

Важное самостоятельное значение имеет подсистема нормативной документации, дающая представление о нормативных характеристиках эластомерных композитов и показателях химико-технологических процессов их переработки.

Подсистема поддержки принятия решений основывается, главным образом, на применении базы знаний по многокомпонентным эластомерным композитам (в работе представлена сформулированной системой продукционных правил) и базы данных реограмм состояния (структура основных таблиц БД представлена на рисунке 19).

Необходимо также создание подсистемы документов для лиц, принимающих решения (ЛПР). В данном блоке представлены формы основных отчетных документов по испытаниям эластомерных композитов и перечень получателей данной информации.

На рисунке 26 приведена блок-схема алгоритма обработки реометрических данных.

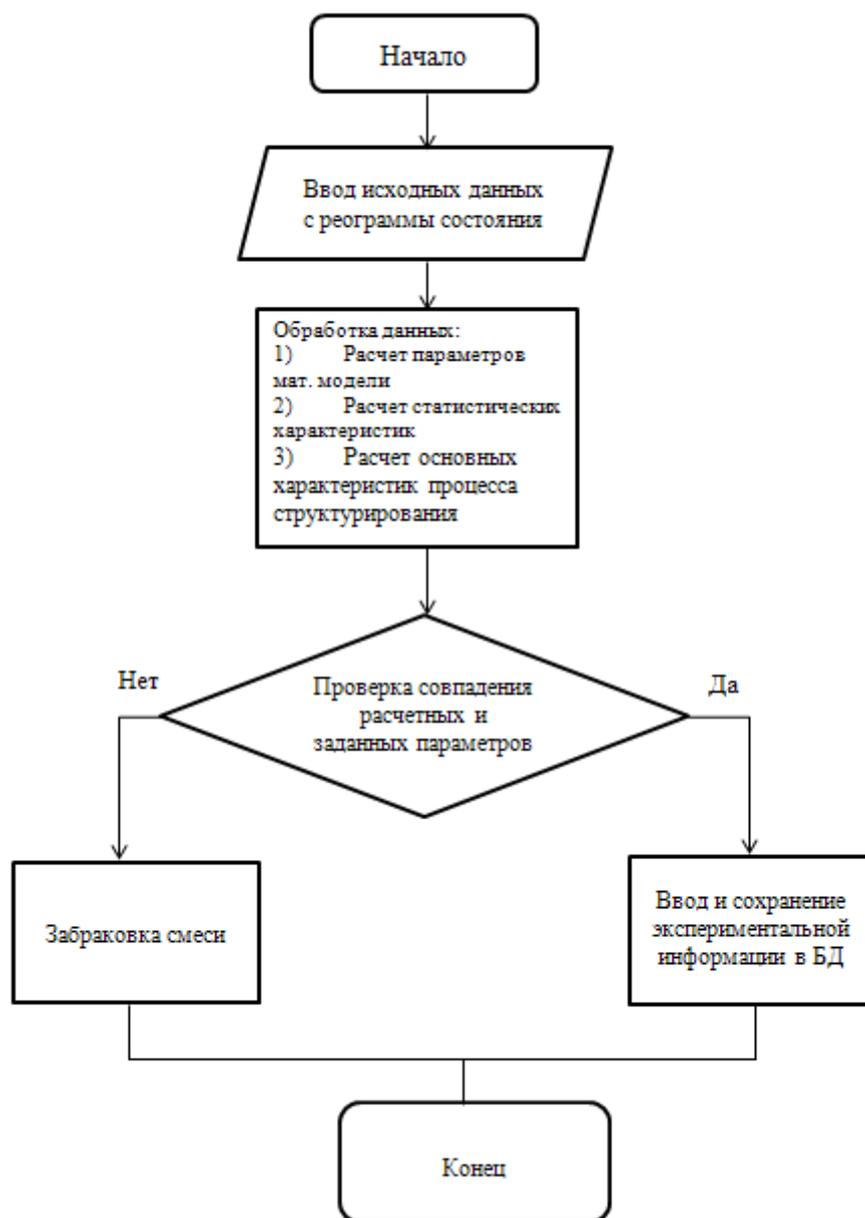


Рисунок 26. Блок-схема алгоритма обработки основной реометрической информации процесса структурирования эластомерных композитов

На первом этапе осуществляется ввод данных с реограммы состояния. Далее происходит их математическая статистическая обработка с расчетом параметров выбранной математической модели. На основании рассчитанных параметров модели в соответствии с методикой, приведенной в параграфе 2.1.1 рассчитываются устойчивые статистические характеристики процесса структурирования многокомпонентных эластомерных композитов. Далее на основе математических соотношений рассчитываются основные характеристики процесса структурирования эластомерных композитов и происходит их сравнение с заданными. В результате при совпадении или незначительном отклонении от заданных параметров производится запись всех характеристик в базу данных

3.4. Выводы.

1. Проведен сравнительный анализ продукционных и когнитивных моделей управления химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов. Показано, что с точки зрения решения поставленной задачи построения экспертной системы управления предпочтение следует отдать продукционной модели.

2. Разработана система продукционных правил для управления химико-технологическими процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов

3. Разработано дерево продукций для анализа процесса структурирования эластомерных композитов.

4. Предложена архитектура интегрированной информационной поддержки для системы управления химико-технологическими процессами смешения и структурирования многокомпонентных эластомерных композитов.

5. Разработана блок-схема алгоритма обработки основной реометрической информации процесса структурирования эластомерных композитов.

Глава 4 РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УЧЕБНО-НАУЧНОГО ТРЕНАЖЕРА ПО СИСТЕМНОМУ АНАЛИЗУ И УПРАВЛЕНИЮ ХИМИКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

4.1 Анализ результатов математической обработки реограмм состояния эластомерных композитов

Для получения кондиционных изделий надлежащего качества необходимо строгое соблюдение регламента всех производственных процессов, промежуточных операций и итоговой операции – процесса вулканизации (структурирования эластомерного композита).

Широко распространен анализ процессов смешения и вулканизации эластомерных композитов с использованием реограмм состояния, полученных по методикам виброреометрических испытаний резиновых смесей [2, 4, 6].

Описание структурирования эластомерных систем с применением анализа кинетических кривых процесса позволяет организовать оперативный контроль и управление технологическими процессами смешения и структурирования эластомерных композитов [1, 2].

В ранее проведенных работах показано, что введение безразмерной величины $\beta = \frac{M - M_{\min}}{M_{\max} - M_{\min}}$, которая характеризует степень завершенности процесса структурирования эластомерной системы, позволяет снизить влияние неконтролируемых переменных и практически совместить множество кривых в одну в параллельном эксперименте, что говорит об их генетическом родстве [9-13]. Также в ряде случаев целесообразно использовать параметр $1-\beta$, характеризующий степень незавершенности процесса, а также характеристики скорости $\frac{d\beta}{dt}$ и ускорения процесса $\frac{d^2\beta}{dt^2}$.

При анализе реограмм обычно выделяют два аспекта интерпретации, качественный и количественный [9–11].

Количественная интерпретация реограмм включает в себя расчет основных вулканизационных характеристик (время начала вулканизации τ_s , оптимума вулканизации τ_{90} , скорости вулканизации R_v), а также коэффициентов нелинейных относительно параметров математических моделей. Выбор подобных математических моделей продиктован возможностью их интерпретации на основе физико-химических представлений и подходов [9-13, 55, 56, 58].

Для описания процесса структурирования эластомерных композитов используются 2 типа кривых – интегральные и дифференциальные кинетические кривые. Кривые второго типа представляют собой дериватограммы (кривые скорости процесса структурирования), они характеризуются более высокой чувствительностью к изменению рецептурно-технологических факторов и к особенностям физико-химических превращений при структурировании [9-12].

Для математического описания интегральных кривых процесса структурирования целесообразно использовать модели, параметры которых выражаются через вулканизационные характеристики. Это уравнения 8013, 8078, 8011, 8013, 8080, 8090 и 8092. Предпочтение следует отдать пятипараметрической модели 8092 по каталогу программы Table Curve 2D [12, 13].

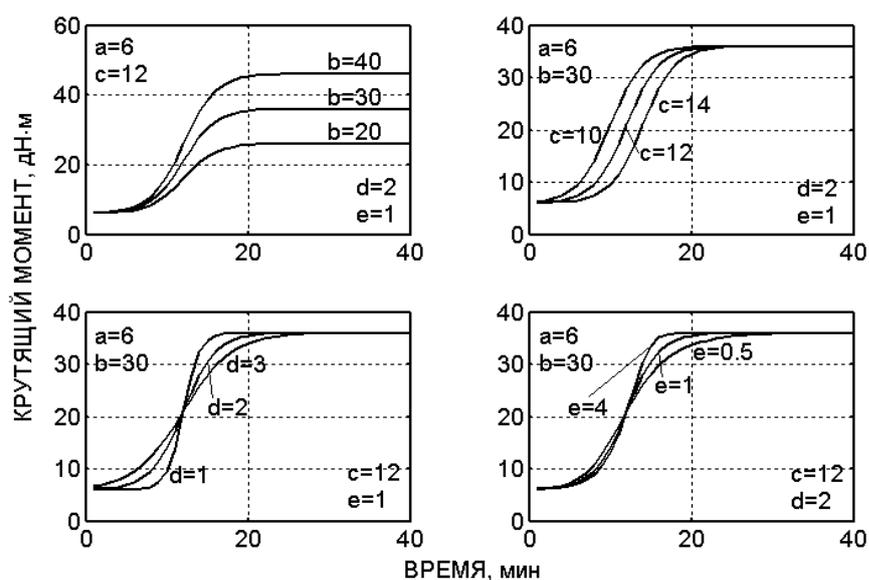


Рисунок 27. Варьирование параметров модели 8092 при описании реограмм состояния многокомпонентных эластомерных композитов

При проведении анализа математической обработки реограмм состояния было установлено, что параметр \mathbf{a} , который численно равен величине минимального крутящего момента \mathbf{M}_{\min} , смещает реограмму в вертикальном направлении и не влияет на ход реометрической кривой [11].

Варьирование параметра \mathbf{b} приводит к пропорциональному подъему кривой, не изменяя его начального положения, что способствует увеличению приращения крутящего момента $\Delta\mathbf{M}$, что приводит к увеличению скорости процесса структурирования, время начала подвулканизации уменьшается [11, 12].

При изменении параметра \mathbf{c} , равного величине 50%-го приращения крутящего момента, интегральная кривая смещается по горизонтали. Скорость процесса уменьшается.

Коэффициенты \mathbf{d} и \mathbf{e} в некоторой степени характеризуют форму кривой процесса структурирования. При уменьшении параметра \mathbf{d} кривая становится более полой. При возрастании параметра \mathbf{d} уменьшается оптимальное время структурирования. Параметр \mathbf{e} характеризует крутовершинность кривой. [11-12].

Анализ реографической информации на основе математических и физико-химических подходов и представлений позволяет наиболее полно описать процесс структурирования эластомерных систем, используя при этом новые характеристики процесса.

4.2 Процедура модификации осей координат при количественной интерпретации реограмм состояния эластомерных композитов.

Приведены некоторые приемы количественной интерпретации реометрических кривых, широко используемых для анализа процесса структурирования эластомерных композитов. С этой целью используются модели, нелинейные относительно параметров, значения которых можно связать с вулканизационными характеристиками. На большом массиве данных показана целесообразность использования обобщенных координат при графической интерпретации реограмм состояния (изотерм поперечного сшивания).

При определенной модификации осей координат построение графических зависимостей для ряда характеристик, таких как момент накопления, момент потерь, тангенс фазового угла и их производных, дает возможность проследить тенденции их изменения во времени [55, 88].

В качестве объектов исследования использовали реометрические кривые для резиновых смесей на основе различных каучуков (натуральный, бутадиен-стирольный, этиленпропиленовый, бутадиеновый), содержащие обычные, полуэффективные и эффективных вулканизирующие системы, а также отличающихся применяемыми марками технического углерода и его содержанием. Общий объем составил более 200 реограмм [87].

Для количественной интерпретации изотерм поперечного сшивания целесообразно использовать модели, параметры которых могут быть интерпретированы на основе физико-химических представлений [9-13]. Обычно устанавливают взаимно-однозначное соответствие между параметрами таких моделей, имеющими определенный физический смысл, и вулканизационными характеристиками. Анализ большого числа реограмм резиновых смесей на основе различных каучуков с использованием широкой гаммы вулканизирующих систем показал, что в большинстве случаев для реограмм со стабилизирующимся во времени t значением крутящего момента M следует отдать предпочтение 5-ти и 4-х параметрическим моделям следующего вида:

$$M = a + b \cdot \left[1 - \left(1 + \exp \left(\frac{t + d \cdot \ln(2^{1/e} - 1) - c}{d} \right) \right)^{-e} \right]. \quad (35)$$

$$M = a + \frac{b}{1 + \exp \left(-\frac{t - c}{d} \right)}. \quad (36)$$

Эти модели представляют собой аналитические выражения функций распределения случайных величин. Параметр a с учетом воспроизводимости реограмм можно рассматривать как минимальный крутящий момент M_{\min} . Параметр b соответствует приращению крутящего момента $\Delta M = M_{\max} - M_{\min}$. Параметр c равен вулканизационной характеристике $t_{C(50)}$. Процентильная широта

$(t_{c(90)} - t_{c(10)})$ рассматриваемых моделей определяется следующими соотношениями [11]:

$$t_{c(90)} - t_{c(10)} = d \cdot \ln \left(\frac{10^{1/e} - 1}{10^{1/e} - 9^{1/e}} \right) + \frac{d}{e} \cdot \ln 9. \quad (37)$$

$$t_{c(90)} - t_{c(10)} = d \cdot 2 \cdot \ln 9 = 4.3944 \cdot d. \quad (38)$$

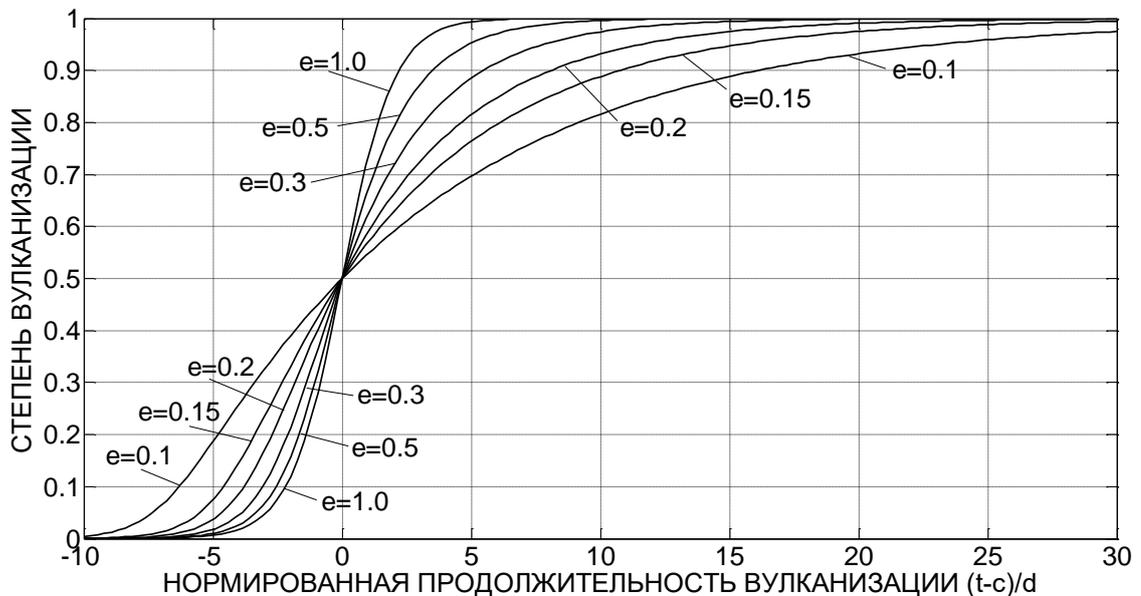
Переходя к степени вулканизации $\beta = (M - M_{\min}) / (M_{\max} - M_{\min})$ [11-13], имеем:

$$\beta = 1 - \left(1 + \exp \left(\frac{t + d \cdot \ln(2^{1/e} - 1) - c}{d} \right) \right)^{-e}. \quad (39)$$

$$\beta = \frac{1}{1 + \exp \left(-\frac{t - c}{d} \right)}. \quad (40)$$

Для того, чтобы получить обобщенные графические решения, введем вместо времени обобщенные нормированные безразмерные характеристики следующего вида: $(t - c)/d$ (модель 8092) и $t - c$ (модель 8011).

Зависимость степени вулканизации от этих характеристик представлена на рисунке 28 для различных значений параметра e (а), и для различных значений параметра d (б).



а

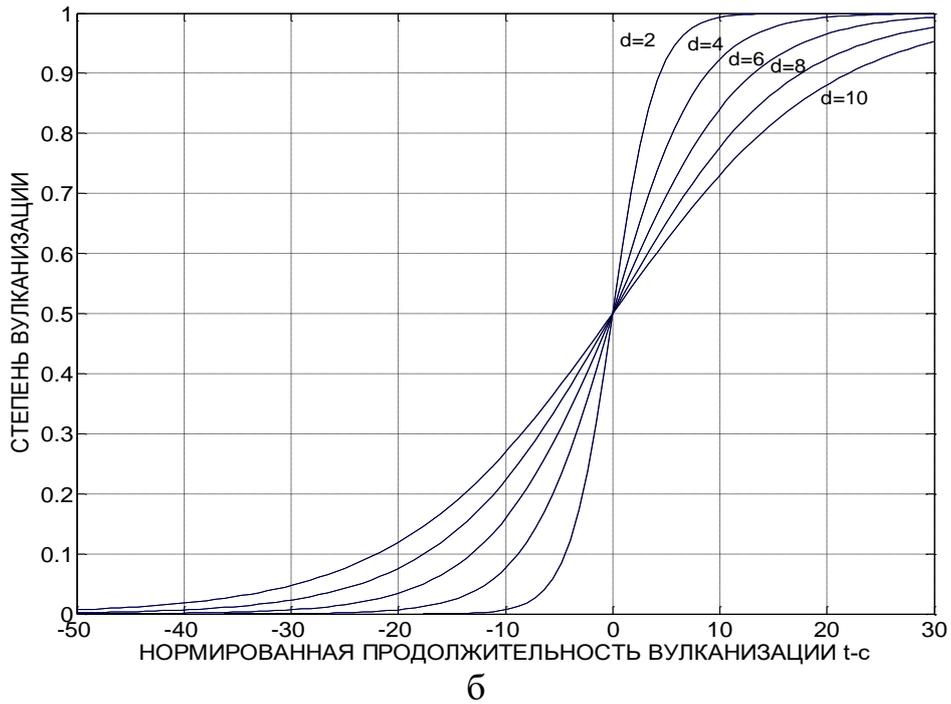
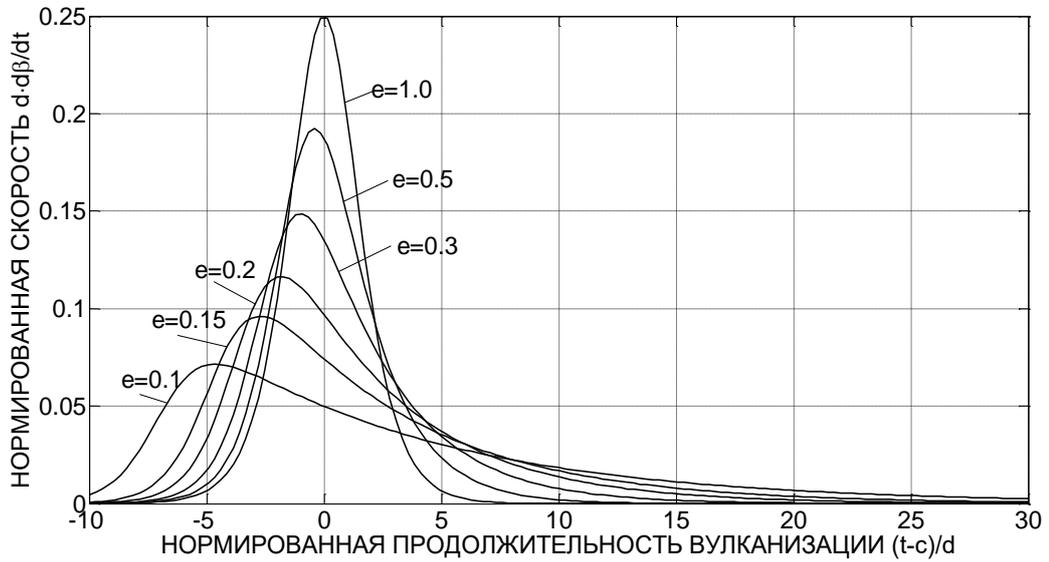


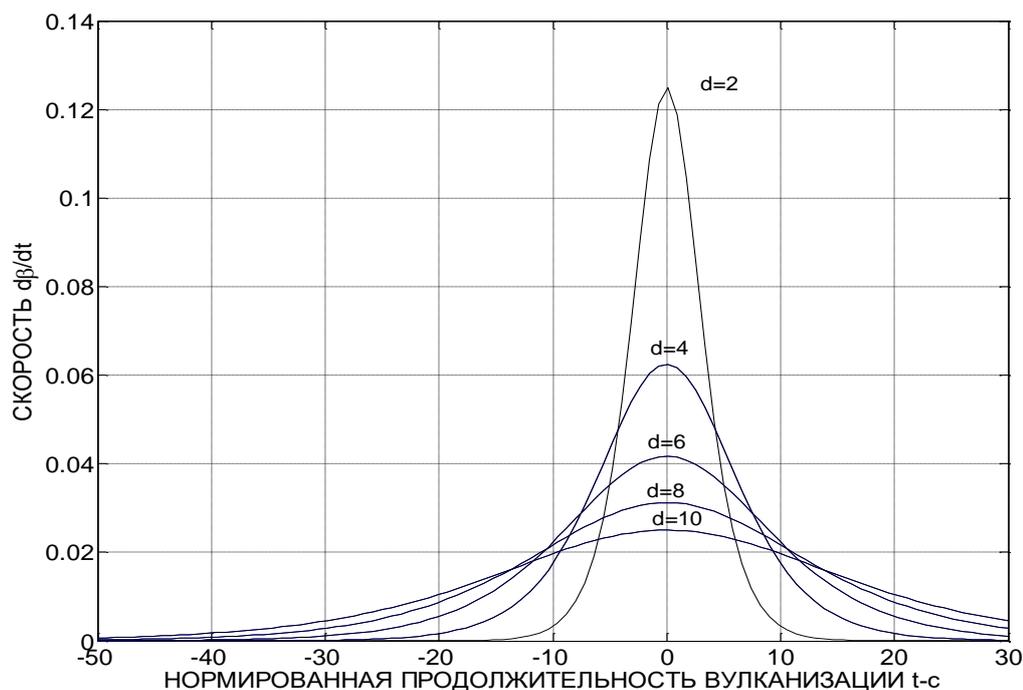
Рисунок 28. Иллюстрация реограмм в обобщенных координатах

Таким образом, можно утверждать, что величины указанных параметров характеризуют индукционный период вулканизации.

На рисунке 29 показаны соответствующие кривые для скорости.



а



б

Рисунок 29. Иллюстрация кривых скорости в обобщенных координатах

Можно видеть, что в случае модели 8092, чем больше значение параметра e , тем больше амплитуда A кривой скорости и меньше мода M_0 , т.е. абсцисса максимума кривой. Для модели 8011 можно отметить, что, чем больше величина параметра d , тем меньше амплитуда кривой скорости, тогда как мода кривых скорости является константой. Эти характеристики кривых скорости в обобщенном виде определяются следующими соотношениями:

Для модели 8092:

$$A \cdot d = (e / (e + 1))^{e+1}; \quad (41)$$

$$(M_0 - c) / d = -\ln(e \cdot (2^{1/e} - 1)).$$

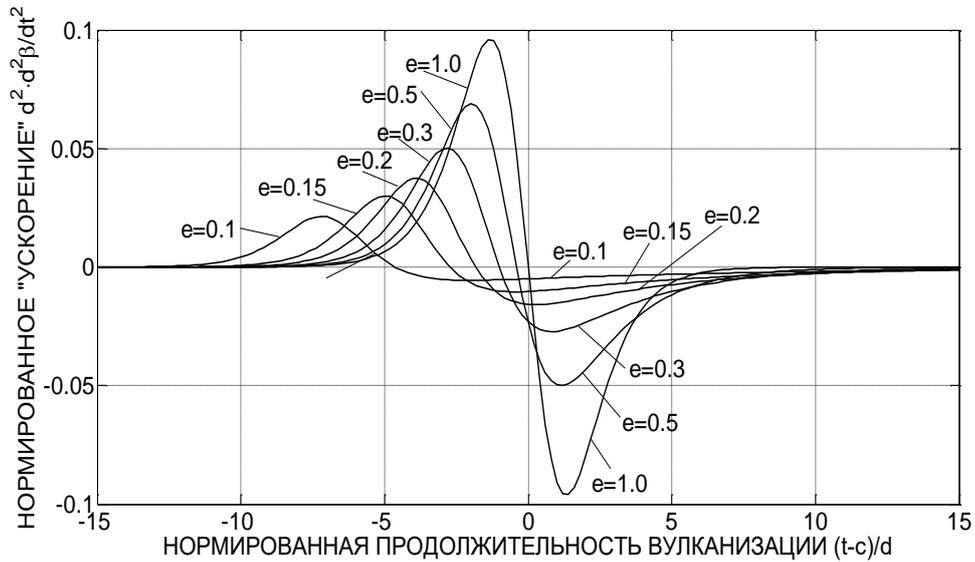
Для модели 8011:

$$A = 1/4d, \quad (42)$$

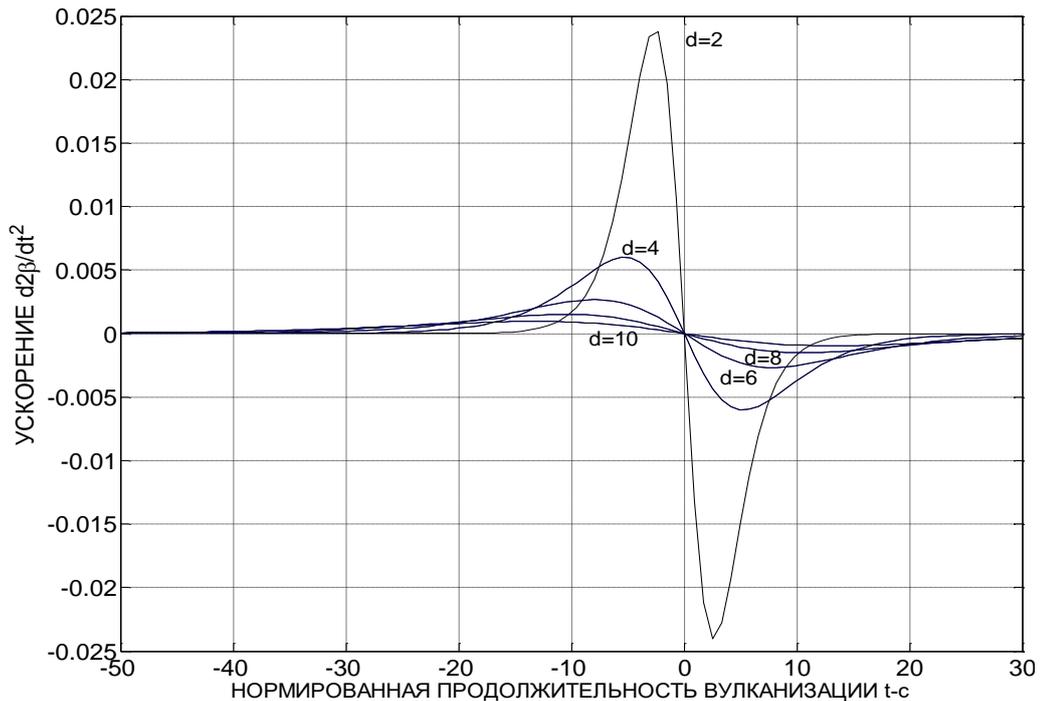
$$M_0 = c.$$

Отметим, что кривая скорости (Рисунок 29 а) при $e=1$ является строго симметричной, здесь $(M_0 - c) / d = 0$ и $A \cdot d = 0.25$. На рисунке 29 б все кривые симметричны относительно начала координат.

На рисунке 30 показана серия кривых скорости изменения скорости («ускорения»).



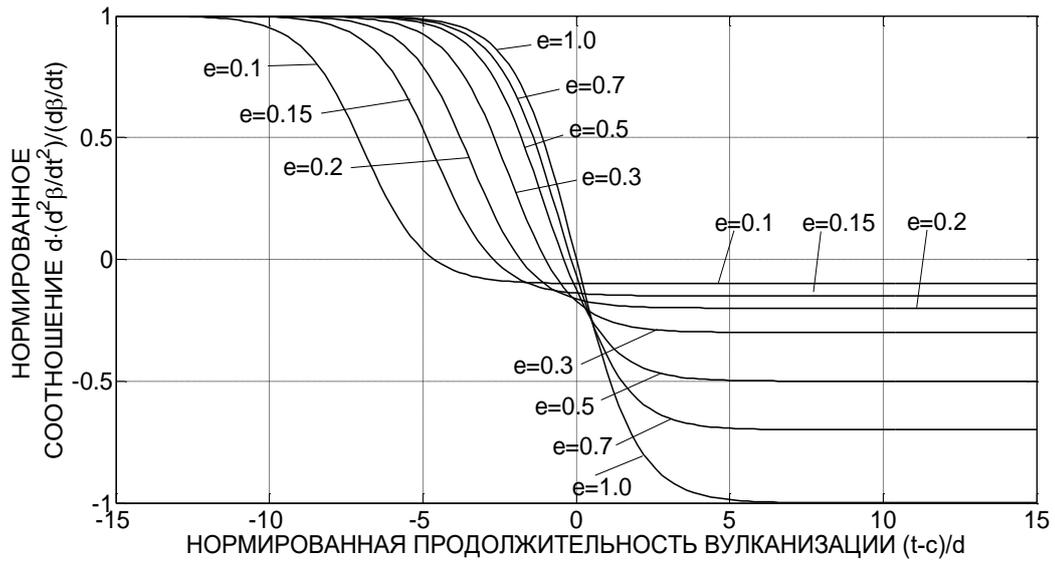
а



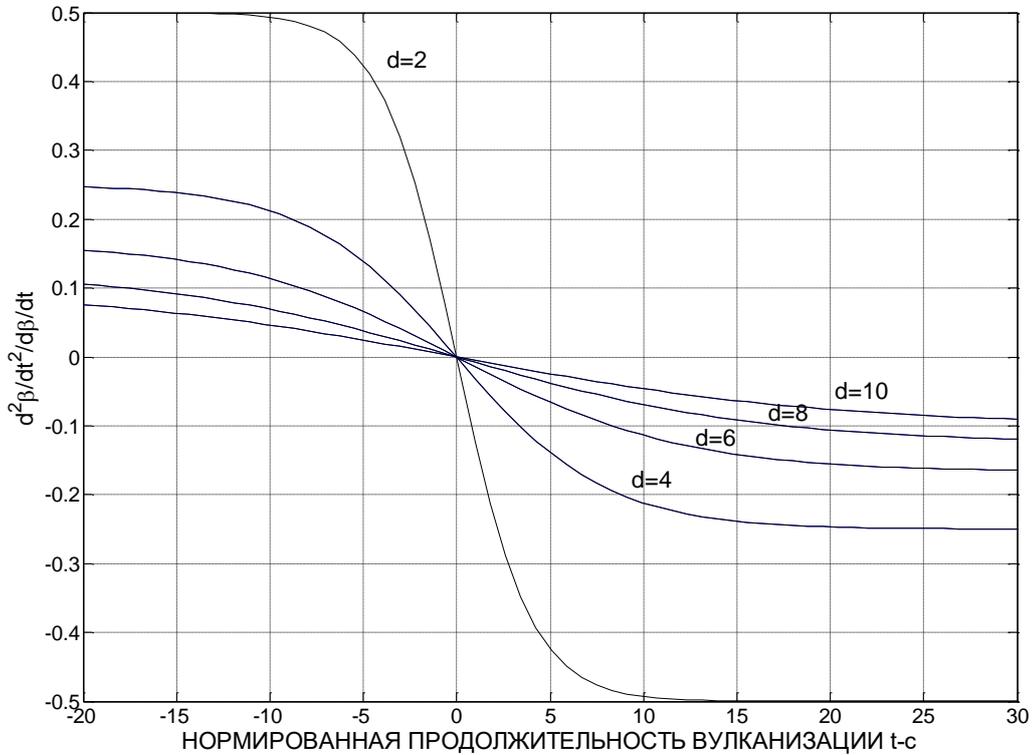
б

Рисунок 30. Иллюстрация кривых «ускорения» в обобщенных координатах. При $e < 1$ (рисунок 28 а) положительная ветвь кривой имеет большую амплитуду, нежели отрицательная ветвь. Во втором случае (рисунок 28 б) кривые симметричны относительно оси абсцисс.

Соответствующие серии кривых для отношения «ускорения» к скорости показаны на рисунке 31.



а

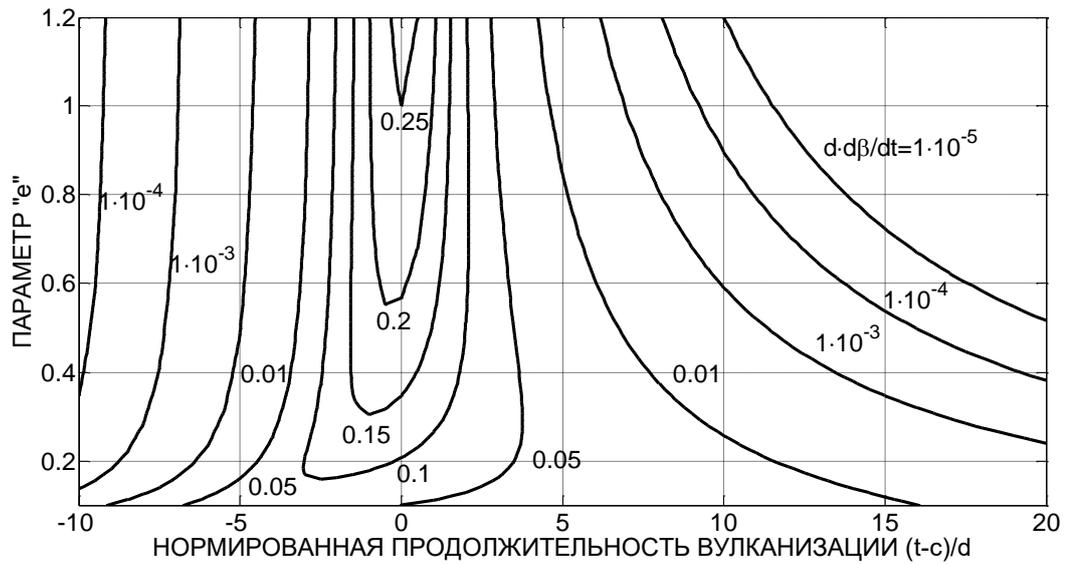


б

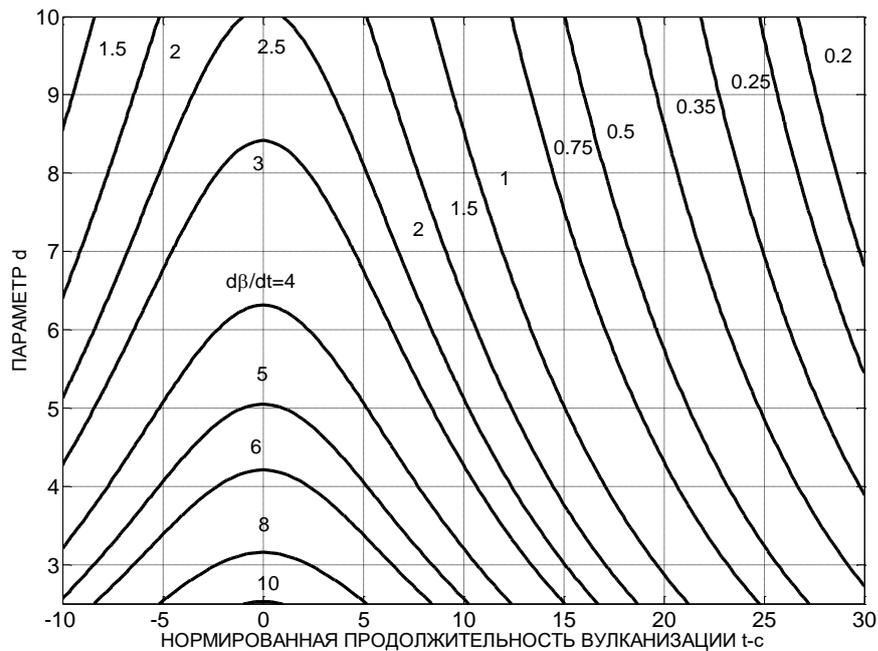
Рисунок 31. Иллюстрация кривых отношения «ускорения» к скорости в обобщенных координатах

Эти кривые по форме подобны «перевернутым» обобщенным реограммам, показанным на рисунке 28. Здесь «индукционный период» возрастает при увеличении значений параметра e (а) и уменьшается при увеличении значений параметра d (б).

В силу того, что модель (39) формально представляет собой интегральную кривую распределения, расстояние между линиями степени вулканизации $\beta=0.9$ и $\beta=0.1$ по горизонтали может рассматриваться как процентильная широта $t_{C(90)} - t_{C(10)}$. Процентильная широта, определяемая соотношениями (3) и (4), тем больше, чем меньше значение параметра e и чем больше значение параметра d . Расстояние между изолиниями β и $1-\beta$ (например, $\beta=0.99$ и $\beta=0.01$) при $e=1$ одинаковое. (Рисунок 32.)



а



б

Рисунок 32. Зависимость скорости вулканизации от нормированной продолжительности вулканизации и параметров d и e реограмм

Анализ взаимосвязей параметров моделей и вулканизационных характеристик

В ранее проведенных работах показано, что, в связи с низкой воспроизводимостью реограмм целесообразнее использовать не сами значения крутящего момента (момента сопротивления материала деформированию) M , а его безразмерную нормированную характеристику β , вычисляемую по следующей формуле: $\beta = (M - M_{\min}) / (M_{\max} - M_{\min})$. ($\beta \in [0; 1]$) [9-13]

При этом, с учетом подстановок, выражения для моделей 8011, 8013 и 8092 запишутся следующим образом:

$$\beta = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{t-c}{d}\right)} \quad (43)$$

$$\beta = \frac{1}{1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d} \quad (44)$$

$$\beta = 1 - \left(1 + \exp\left(\frac{t + d \cdot \ln(2^{1/e} - 1) - c}{d}\right)\right)^{-e}. \quad (45)$$

Данная величина характеризует степень завершенности процесса структурирования эластомерных систем. При этом первая производная $\frac{d\beta}{dt}$ представляет собой скорость протекания процесса структурирования и после преобразований записывается следующим образом:

$$1 - \beta = 1 - \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{t-c}{d}\right)}; \quad \frac{\exp\left(-\frac{t-c}{d}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{t-c}{d}\right)} = \frac{1}{d} \times \beta \times (1 - \beta);$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{d} \times \frac{\exp\left(-\frac{t-c}{d}\right)}{\left(1 + \exp\left(-\frac{t-c}{d}\right)\right)^2} \quad (46)$$

Аналогично для моделей 8013 и 8092:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{d}{c} \times \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d} \right)^{\frac{d-1}{d}} \times \left(1 - \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d} \right) \right)^{\frac{d+1}{d}} \quad (47)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{e}{d} \cdot \frac{\exp\left(\frac{t + d \cdot \ln(2^{1/e} - 1) - c}{d}\right)}{\left(\exp\left(\frac{t + d \cdot \ln(2^{1/e} - 1) - c}{d}\right) + 1\right)^{\frac{d+1}{d}}}. \quad (48)$$

Выражая время t через степень вулканизации β , получим дифференциальное уравнение следующего вида:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{d} \cdot \beta \cdot (1 - \beta). \quad (49)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{d}{c} \cdot \beta^{\frac{d-1}{d}} \cdot (1 - \beta)^{\frac{d+1}{d}}. \quad (50)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{e}{d} \cdot (1 - \beta) \cdot (1 - (1 - \beta)^{1/e}). \quad (51)$$

Вторая производная $\frac{d^2\beta}{dt^2}$ характеризует ускорение процесса и может быть выражена следующим образом:

$$\frac{d}{d\beta} \left(\frac{1}{d} \times \beta \times (1 - \beta) \right) = \frac{1}{d} \times (1 - \beta) - \frac{1}{d} \times \beta = \frac{1}{d} (1 - 2 \times \beta)$$

$$\frac{d^2\beta}{dt^2} = \frac{1}{d} \times \beta \times (1 - \beta) \times \frac{1}{d} \times (1 - 2 \times \beta) = \frac{1}{d^2} \times \beta \times (1 - \beta) \times (1 - 2 \times \beta).$$

$$\frac{d^2\beta}{dt^2} = \frac{1}{d} \times (1 - 2 \times \beta), \quad 1 - 2 \times \beta = 1 - \frac{2}{1 + \exp\left(-\frac{t-c}{d}\right)} = \frac{-1 + \exp\left(-\frac{t-c}{d}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{t-c}{d}\right)}.$$

$$\frac{d^2 \beta}{dt^2} = \frac{1}{d^2} \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{t-c}{d}\right)} \times \frac{\exp\left(-\frac{t-c}{d}\right)}{\left(1 + \exp\left(-\frac{t-c}{d}\right)\right)} \times \frac{\left(-1 + \exp\left(-\frac{t-c}{d}\right)\right)}{1 + \exp\left(-\frac{t-c}{d}\right)};$$

$$\frac{d^2 \beta}{dt^2} = \frac{1}{d^2} \frac{\exp\left(-\frac{t-c}{d}\right) \times \left(\exp\left(-\frac{t-c}{d}\right) - 1\right)}{\left(1 + \exp\left(-\frac{t-c}{d}\right)\right)^3}. \quad (52)$$

Выражения для моделей 8013 и 8092 получаются аналогично и записываются следующим образом:

$$\frac{d^2 \beta}{dt^2} = \frac{\beta^{\left(\frac{d-1}{d}\right)} \times (1-\beta)^{\frac{d+1}{d}} \times (d-1) - \beta^{\frac{d-1}{d}} \times (1-\beta)^{\left(\frac{d+1}{d}-1\right)} \times (d+1)}{c} \quad (53)$$

$$\frac{d^2 \beta}{dt^2} = \frac{1}{d} \cdot \left((e+1) \cdot (1-\beta)^{1/e} - e \right) \cdot \frac{e}{d} \cdot (1-\beta) \cdot (1 - (1-\beta)^{1/e}). \quad (54)$$

Получение соотношений между параметрами моделей c , d , e и вулканизационными характеристиками t_{10} , t_{50} и t_{90} представляет самостоятельный интерес для интерпретации полученных моделей с учетом физико-химических подходов [9-13]. Полученные соотношения представлены в приложении 1.

Для полученных функциональных соотношений между коэффициентами моделей и параметрами процесса структурирования для модели 8092 были получены обобщенные графические решения (семейство изолиний) для скорости $\frac{d\beta}{dt}$, ускорения процесса $\frac{d^2 \beta}{dt^2}$ и процентильной широты $t_{90}-t_{10}$ от параметров d и e модели. (рисунок 33.)

Модель (49) формально представляют собой интегральную кривую распределения, расстояние между линиями степени вулканизации $\beta=0.9$ и $\beta=0.1$ по горизонтали может рассматриваться как процентильная широта $(t_{C(90)}-c)/d - (t_{C(10)}-c)/d = t_{C(90)} - t_{C(10)}$. Процентильная широта, определяемая соотношением (61), тем больше, чем меньше значение параметра e и чем больше значение параметра d . Та же зависимость наблюдается и для изолиний скорости вулканизации.

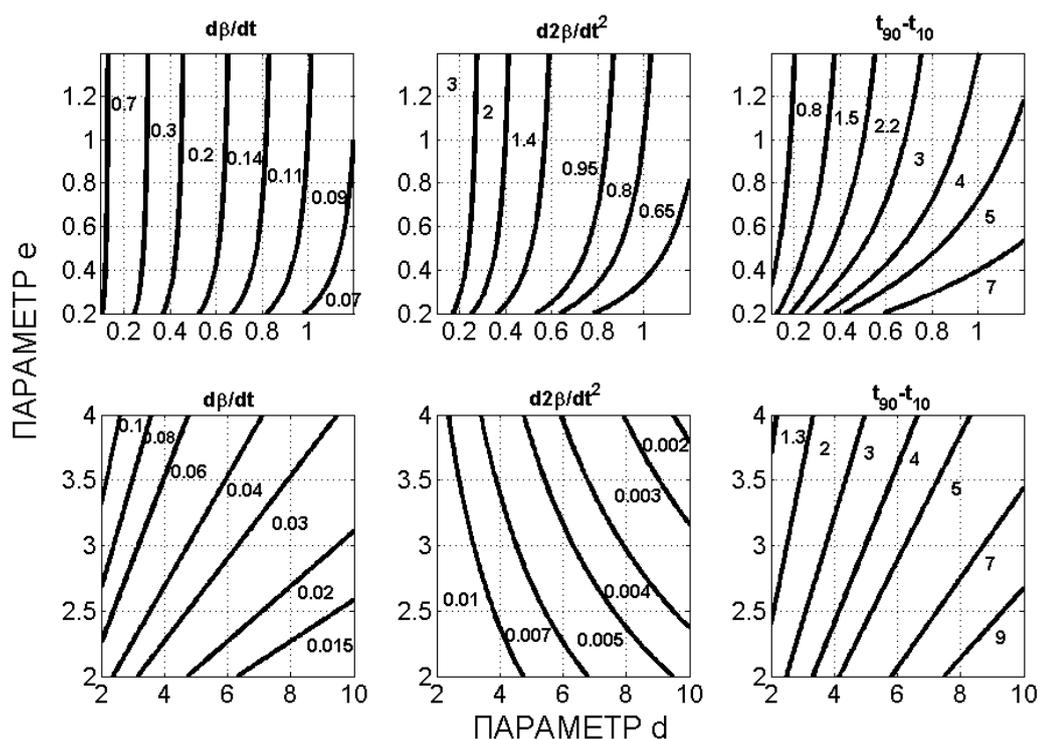


Рисунок 33. Контурные графики изменения скорости вулканизации $\frac{d\beta}{dt}$, ускорения $\frac{d^2\beta}{dt^2}$ и процентильной широты $t_{90}-t_{10}$ от коэффициентов d и e для модели 8092 (верхний ряд – $t = t_{10}$, нижний ряд – $t = t_{90}$)

4.3 Анализ корреляционных соотношений при обработке реограмм состояния эластомерных композитов

Реограмма процесса вулканизации представляет собой зависимость энергии, затрачиваемой на создание деформации сдвига в образце, от продолжительности вулканизации. Нисходящая ветвь реометрической кривой на первой стадии процесса обусловлена прогревом образца и существенного значения для анализа кинетики процесса вулканизации не имеет. Поэтому при количественной интерпретации реометрических кривых можно принять, что величина крутящего момента M в момент времени $t=0$ равна минимальному крутящему моменту.

Для описания реограммы первого типа (со стабилизирующимся значением крутящего момента) мы использовали модель 8092 [12].

В этом выражении (с учетом ошибки опыта) параметр a равен величине минимального крутящего момента M_{min} , параметр b соответствуют приращению

крутящего момента $M_{max}-M_{min}$, значение параметра c равно вулканизационной характеристике t_{50} .

Параметры d и e могут быть представлены, например, следующим соотношением, связывающим их с вулканизационными характеристиками t_{90} и t_{50} :

$$d = \frac{t_{90} - t_{50}}{\ln(10^{1/e} - 1) - \ln(2^{1/e} - 1)} \quad (55)$$

Представленная выше модель относится к разряду моделей для описания кривых распределений и реализуется в прикладной программе TableCurve 2D (SYSTAT).

Для оценки качества модели в программе используется ряд критериев качества модели.

Сумма квадратов, связанная с ошибкой, и равная сумме квадратов отклонений экспериментальных M_i и рассчитанных в соответствии с выражением (1) значений крутящего момента M_{ip} (n – количество экспериментальных точек):

$$SSE = \sum_{i=1}^n (M_i - M_{ip})^2 \quad (56)$$

Сумма квадратов относительно среднего \bar{M} (общая сумма квадратов):

$$SSE = \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 \quad (57)$$

Коэффициент детерминации:

$$r^2 = 1 - SSE / SSM \quad (58)$$

Стандартная ошибка:

$$S = \sqrt{SSE / f}, \quad (59)$$

где f – число степеней свободы, равное количеству экспериментальных точек за вычетом числа параметров модели: $f = n - m$.

Критерий Фишера:

$$F = \frac{(SSM - SSE)/(m-1)}{SSE/f} \quad (60)$$

В качестве объектов исследования использовались реограммы, опубликованные фирмой «Монсанто». Объем – 158 кривых на основе различных каучуков (натуральный, бутадиен-стирольный, этилен-пропиленовый, дивиниловый) с использованием разнообразных вулканизирующих систем и марок технического углерода.

Для всех кривых были найдены вулканизационные характеристики t_{10} , $t_{50=C}$ (медиана), t_{90} . Путем дифференцирования исходных реограмм были получены кривые скорости (размерность мощности). Эти кривые аппроксимировались следующей моделью:

$$V = \frac{A}{D} \left(1 + \exp\left(\frac{t + C \cdot \ln(D) - B}{C}\right) \right)^{-(D-1)/D} (D+1)^{(D+1)/D} \exp\left(\frac{t + C \cdot \ln(D) - B}{C}\right) \quad (61)$$

В этом соотношении A – амплитуда кривой скорости (максимальное значение скорости), B – мода (абсцисса максимума скорости).

Параметры дифференциальной модели следующим образом выражаются через параметры модели интегральной:

$$A = \frac{b}{d} \cdot \left(\frac{e}{e+1}\right)^{e+1}; B = c - d \cdot \ln(e \cdot (2^{1/e} - 1)); C = d; D = 1/e. \quad (62)$$

В качестве количественных характеристик кривой использовались амплитуда, мода ($Mo=B$) и четыре статистических момента, которые применяются для интерпретации кривых статистических распределений (математическое ожидание, дисперсия, коэффициент асимметрии и коэффициент эксцесса [10, 12].

В таблице 7 приведены значения коэффициентов парной корреляции для одиннадцати характеристик интегральных (реограммы) и дифференциальных

(скорость) кинетических кривых. Кроме рассмотренных показателей в расчет включены параметры интегральных кривых d и e .

Коэффициент парной корреляции r_{xy} двух характеристик x и y определяется следующим соотношением:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (63)$$

Здесь \bar{x} и \bar{y} – средние значения соответствующих массивов данных.

Таблица 7. Коэффициенты парной корреляции характеристик интегральных и дифференциальных кинетических кривых процесса структурирования

	d	e	t10	t90	t50	A	Mo	Mx	D	Sk	E
d	1.000	0.545	0.887	0.833	0.904	-0.553	0.917	0.866	0.604	-0.550	-0.490
e	0.435	1.000	0.480	0.176	0.401	0.062	0.513	0.272	-0.041	-0.481	-0.365
t10	0.827	0.335	1.000	0.881	0.986	-0.518	0.991	0.869	0.528	-0.457	-0.382
t90	0.837	0.028	0.864	1.000	0.947	-0.724	0.869	0.925	0.735	-0.398	-0.335
t50	0.876	0.263	0.984	0.938	1.000	-0.608	0.978	0.912	0.613	-0.452	-0.379
A	-0.617	0.079	0.554	-0.738	-0.638	1.000	-0.516	-0.639	-0.511	0.177	0.130
Mo	0.873	0.372	0.996	0.871	0.987	0.569	1.000	0.872	0.537	-0.484	-0.413
Mx	0.773	-0.003	0.805	0.941	0.876	-0.739	0.810	1.000	0.807	-0.571	-0.549
D	0.566	-0.233	0.536	0.823	0.649	-0.570	0.540	0.825	1.000	-0.404	-0.478
Sk	-0.033	-0.224	0.060	0.078	0.058	-0.028	0.042	0.120	0.257	1.000	0.910
E	0.301	0.473	0.418	0.161	0.345	0.023	0.416	0.099	-0.029	0.592	1.000

В таблице 7 выше главной диагонали представлены значения коэффициентов парной корреляции для всех резиновых смесей (158 реограмм), ниже главной диагонали даны значения коэффициентов корреляции только для смесей на основе натурального каучука (74 реограммы). Табличное значение коэффициента корреляции при числе степеней свободы 156 (158–2) и 72 (74–2) и вероятности 95% составляет соответственно 0.156 и 0.229.

Имеет место высокий уровень тесноты связи между вулканизационными характеристиками t_{10} , t_{50} и t_{90} , параметрами Mo и Mx и коэффициентом d интегральной кривой.

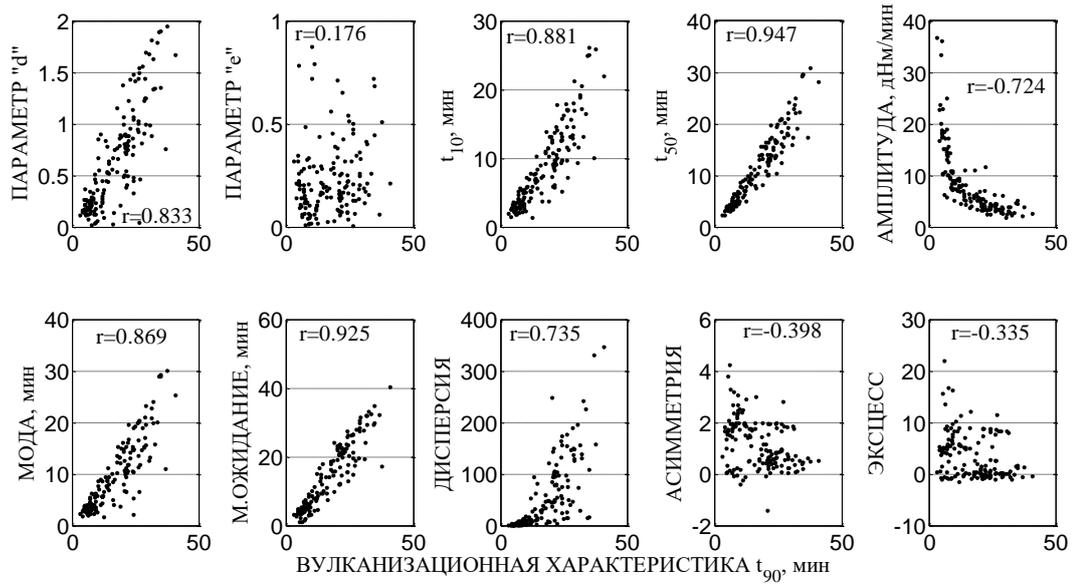


Рисунок 34. Поля рассеяния

На рисунке 34 в качестве примера показаны подтверждающие это поля рассеяния (158 точек) для характеристики t_{90} .

Шесть откликов (характеристики t_{10} , t_{50} и t_{90} , параметры M_0 и M_x и коэффициент d) связывают $(6!/(2! \cdot (6-2)!))=15$ коэффициентов корреляции. Среднее значение коэффициентов корреляции для всех 158 смесей составляет 0.909, для смесей на основе НК несколько ниже (0.884).

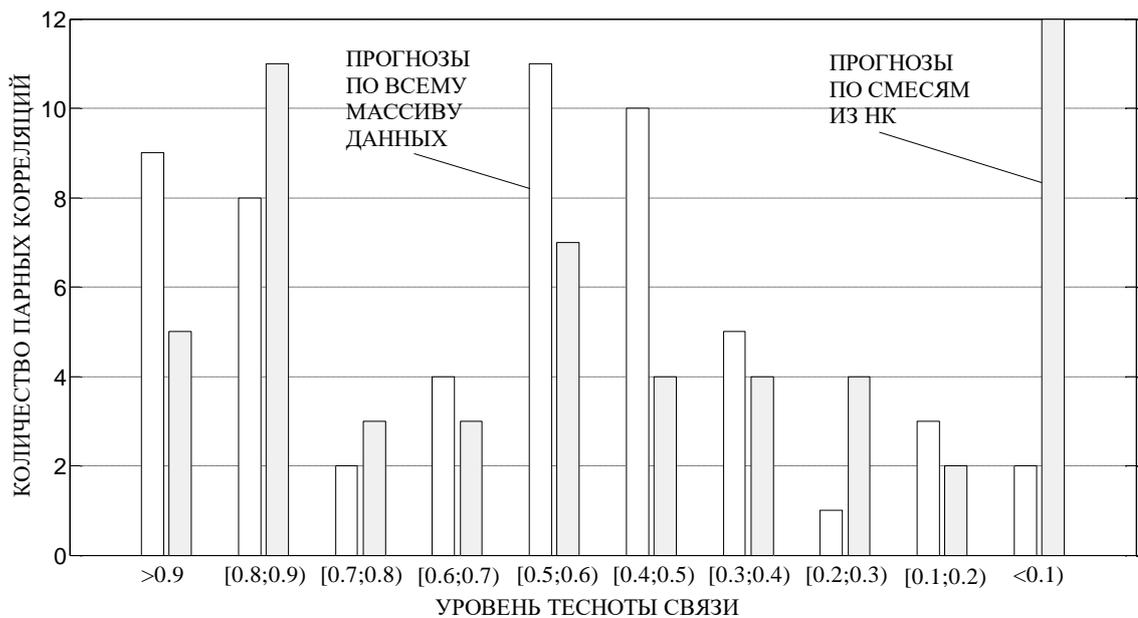


Рисунок 35. Коэффициенты корреляции для смесей по всему массиву данных (белые столбцы) и для смесей на основе натурального каучука (серые столбцы)

Рисунок 35 иллюстрирует количество парных корреляций для различных уровней тесноты связи. Здесь обращает на себя внимание большое количество низких значений (по модулю) коэффициентов корреляции при анализе смесей на основе натурального каучука.

На рис. 36 показаны значения разности (по модулю) значений коэффициента корреляции r_1 для всех смесей и только для смесей на основе НК (r_2). Эта разница показана в виде ломаной линии в нижней части графика.

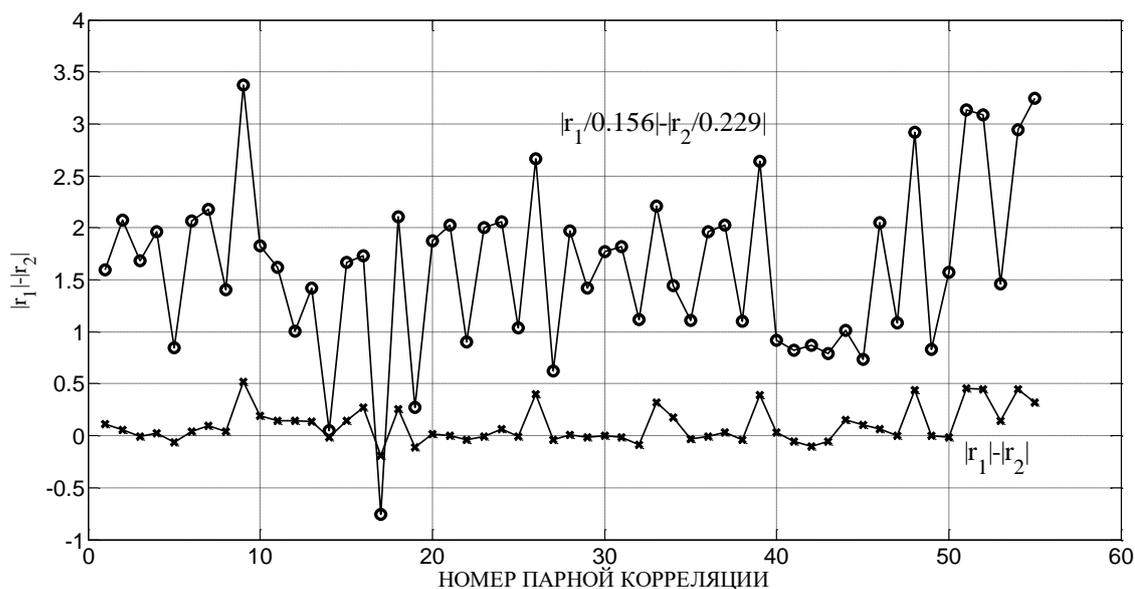


Рисунок 36. Нормировка значений коэффициентов корреляции

Количество парных корреляций составляет $11!/(2! \cdot (11-2)!)=55$. Из этих 55 случаев в 22 коэффициент корреляции для смесей из НК превышает (по модулю) соответствующие коэффициенты по всем смесям, т.е. $|r_1| < |r_2|$. Однако, на наш взгляд, нельзя сравнивать между собой коэффициенты корреляции, полученные по различным по объему массивам данных. Поэтому целесообразно в рассматриваемом случае перейти к нормированным значениям коэффициентов корреляции, разделив их на табличные значения. Такие данные представлены в виде ломаной линии в верхней части графика на рисунке 34. Только в одном случае из 55 прогноз по смесям из НК оказывается лучше, чем по всему массиву данных.

Рассмотрим некоторые возможности использования методов множественной корреляции. Сделаем это на примере прогнозирования показателя t_{90} . Для этого строим линейную модель, характеризующую зависимость характеристики t_{90} от t_{50} ($t_{90}=2.548885+1.275099 \cdot t_{50}$) и вычисляем критерии качества полученной модели (формулы 63-67). Далее переходим к анализу влияния двух предикторов (t_{50} и t_{10}) также в форме линейной модели $t_{90}=0.288421+3.699572 \cdot t_{50}-2.931273 \cdot t_{10}$. Процедура осуществляется последовательным перебором всех полученных показателей.

Линейная модель для десяти предикторов выглядит следующим образом:
 $t_{90}=0.835607+3.492829 \cdot t_{50}-2.465937 \cdot t_{10}-0.108361 \cdot M_o+0.061184 \cdot M_x+0.001932 \cdot A$
 $0.002599 \cdot D - 0.309673 \cdot S_k+0.050443 \cdot E-2.329039 \cdot d-2.149445 \cdot e$.

На рисунке 37 показана взаимосвязь экспериментальных и рассчитанных значений t_{90} по одному предиктору и по десяти предикторам. Улучшение прогноза при увеличении количества предикторов не вызывает сомнений.

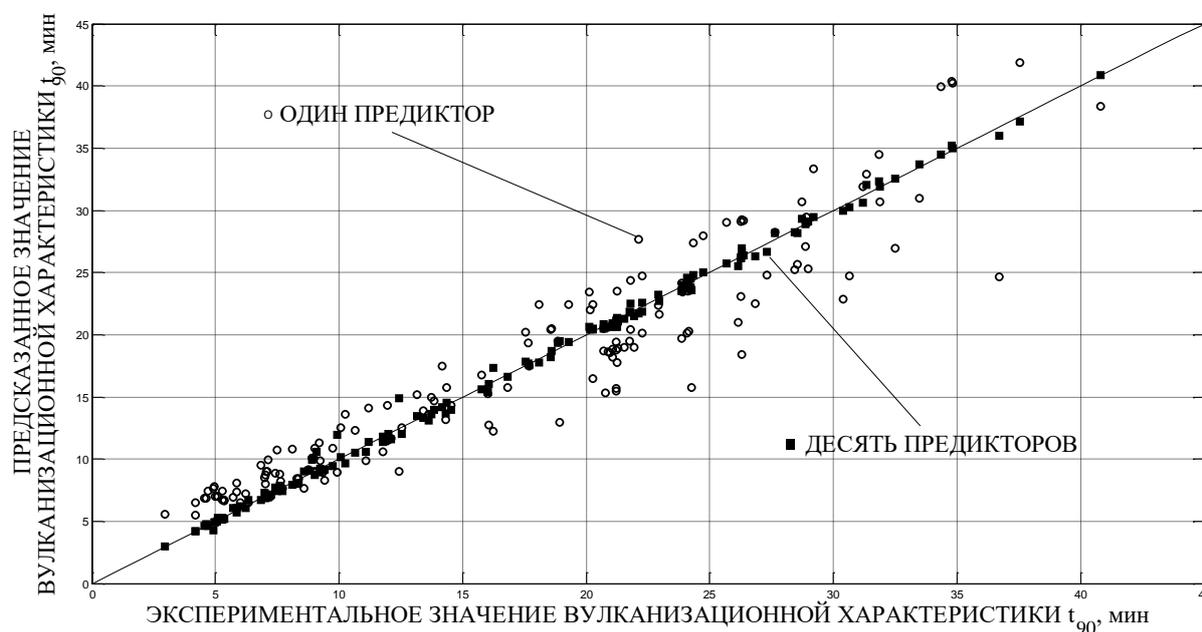


Рисунок 37. Соотношение экспериментальных и рассчитанных значений вулканизационной характеристики t_{90}

Это подтверждается данными о значениях критериев качества модели при изменении количества предикторов (рисунок 38).

Коэффициент детерминации и величина критерия Фишера резко возрастают при переходе от одного предиктора к двум. Значения стандартной ошибки и суммы квадратов отклонений экспериментальных значений вулканизационной характеристики t_{90} от рассчитанных также резко при этом падают. Это, видимо, обусловлено высоким уровнем парной корреляции между показателями t_{90} , t_{50} и t_{10} . Характер линий на рисунке 38, безусловно, зависит от порядка ввода предикторов в уравнение взаимосвязи свойств.

Участок падения значений критерия Фишера обусловлен увеличением количества параметров модели: модели с меньшим количеством параметров при прочих равных условиях будут характеризоваться меньшим значением критерия Фишера. Рост значений критерия Фишера при большом количестве предикторов связан с тем, что влияние эффекта изменения количества предикторов снижается, и наличие парной корреляции «поднимает» линию вверх.

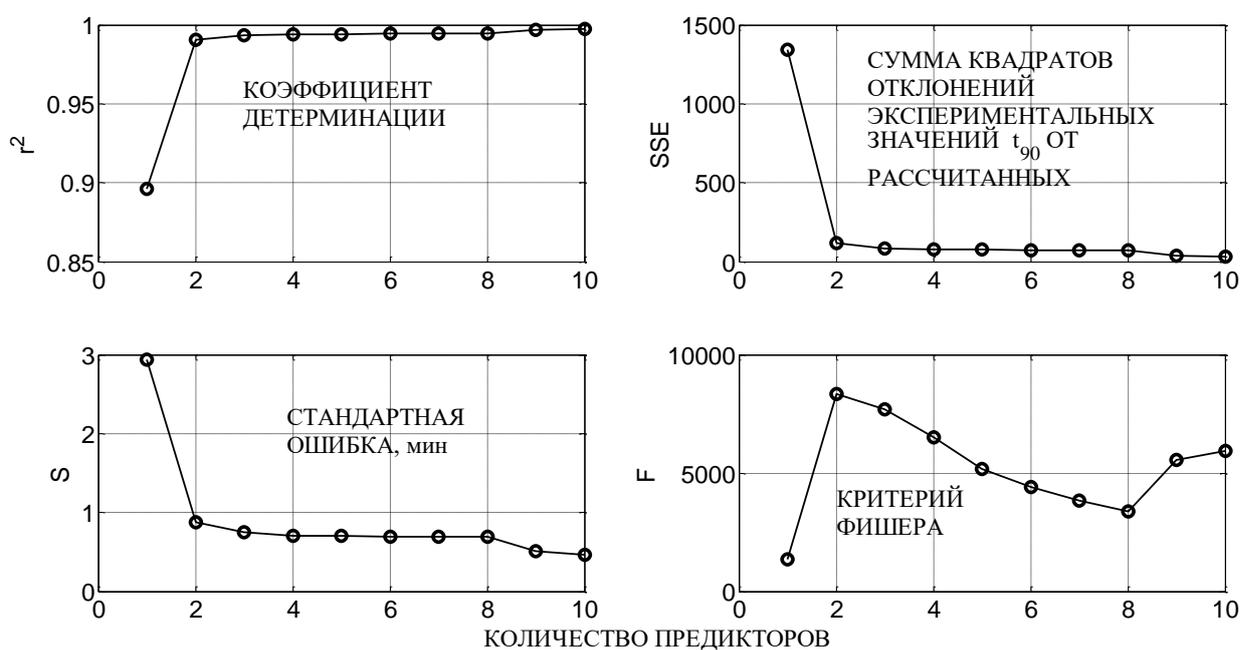


Рисунок 38. Критерии качества линейных моделей для прогнозирования вулканизационной характеристики t_{90}

4.4 Построение графических зависимостей основных количественных характеристик процесса структурирования эластомерных композитов от рецептурно-технологических факторов

Проведенные в главе 2 исследования по интерпретации реограмм состояния многокомпонентных эластомерных композитов на основе нелинейных относительно параметров математических моделей позволяют использовать полученные эмпирические зависимости для построения комплекса фазовых портретов процесса структурирования многокомпонентных эластомерных композитов. Построение ряда графических изображений для различных параметров, количественно характеризующих реограмму состояния и уровни изменения рецептурно-технологических факторов дает технологу всю необходимую информацию для контроля и управления процессом.

На рисунке 39 приведены изолинии процентильной широты при варьировании параметров реограммы d и e .

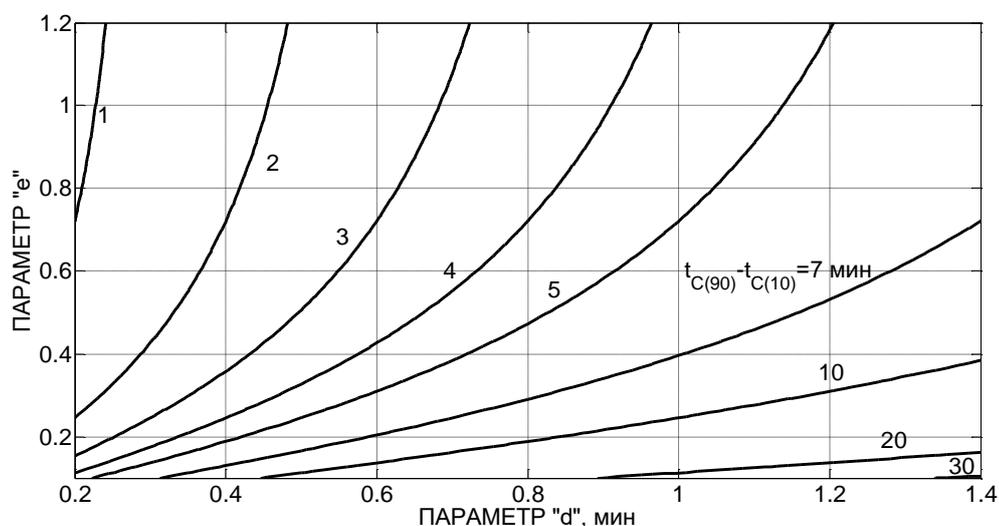


Рисунок 39. Зависимость процентильной широты от параметров d и e реограммы

На рисунке 40 показана зависимость нормированной скорости вулканизации $d \cdot d\beta/dt$ от степени вулканизации β при различных значениях параметра e реограммы, т.н. номограмма процесса структурирования.

Пунктирной линией обозначены координаты экстремумов соответствующих кривых. В интервале значений параметра e не более 0.25-0.3 может быть принята линейная зависимость скорости процесса от степени вулканизации в главном периоде ($\beta = 0.5-0.9$).

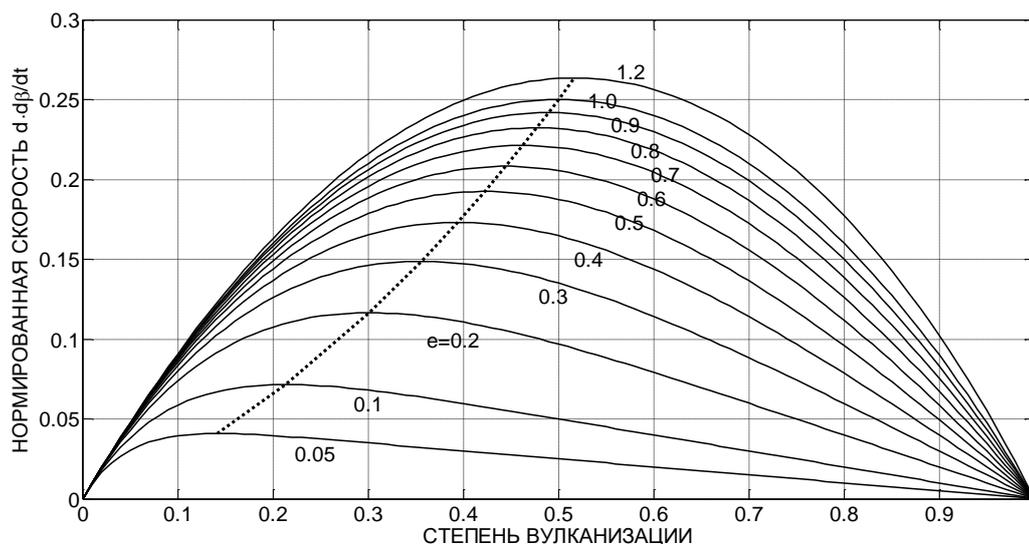


Рисунок 40. Зависимость нормированной скорости вулканизации от степени вулканизации

Площадь под кривой, т.е. интеграл вида:

$$S = \int_0^1 e \cdot (1 - \beta) \cdot (1 - (1 - \beta)^{1/e}) d\beta, \quad (64)$$

определяется простым функциональным соотношением: $S=0.5 \cdot e / (1+2 \cdot e)$ и варьируется в выбранном диапазоне изменения параметра e от 0.0227 до 0.1765 мин.

Если принять область значений параметра d от 0.2 до 1.4, то искомый интеграл можно определить в пределах от 0.015 до 0.88.

Влияние уровня рецептурно-технологических факторов на параметры математических моделей и характеристики процесса структурирования эластомерных композитов приведено на рис. 41-43 и в приложении 2.

Приведенные графики наглядно демонстрируют изменения величин основных параметров процесса структурирования при варьировании параметров математических моделей и уровней рецептурно-технологических факторов.

Как видно из рисунка 41, температура незначительно влияет на степень структурирования. Повышение температуры обработки композита приводит к увеличению скорости процесса его структурирования, что хорошо согласуется с литературными и экспериментальными данными по кинетике процесса.

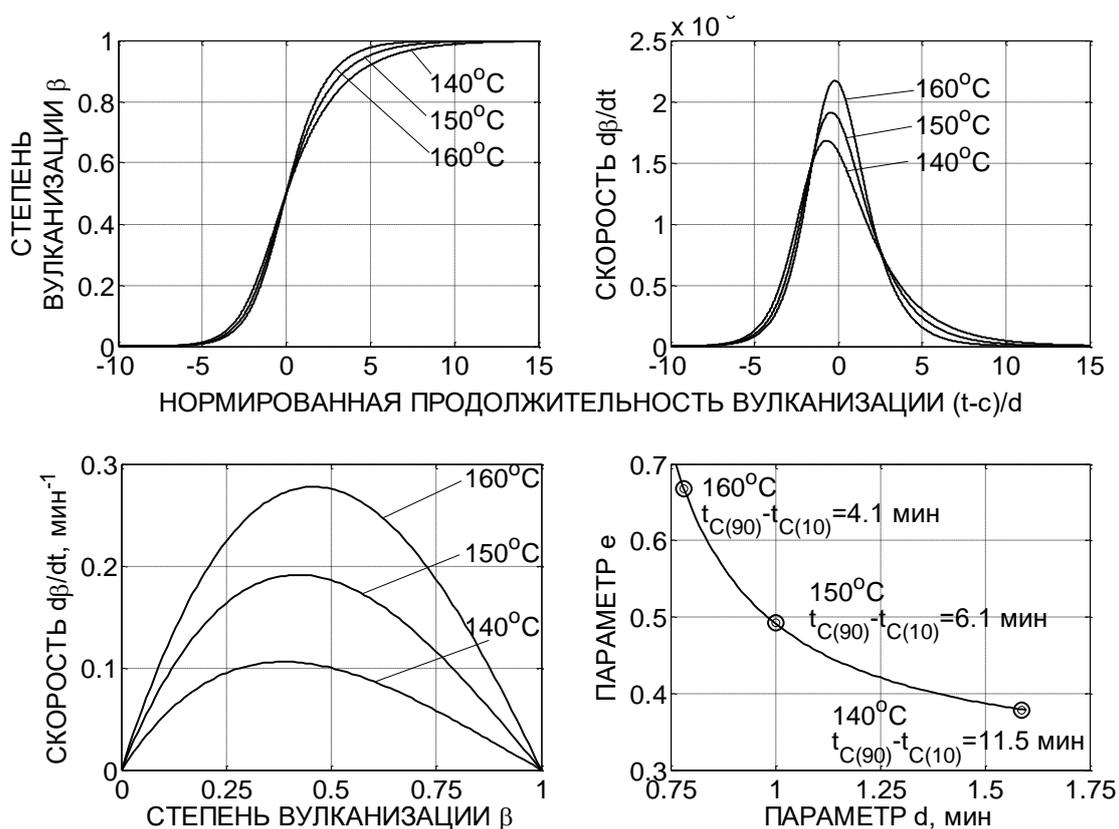


Рисунок 41. Влияние температуры на основные параметры процесса структурирования эластомерного композита

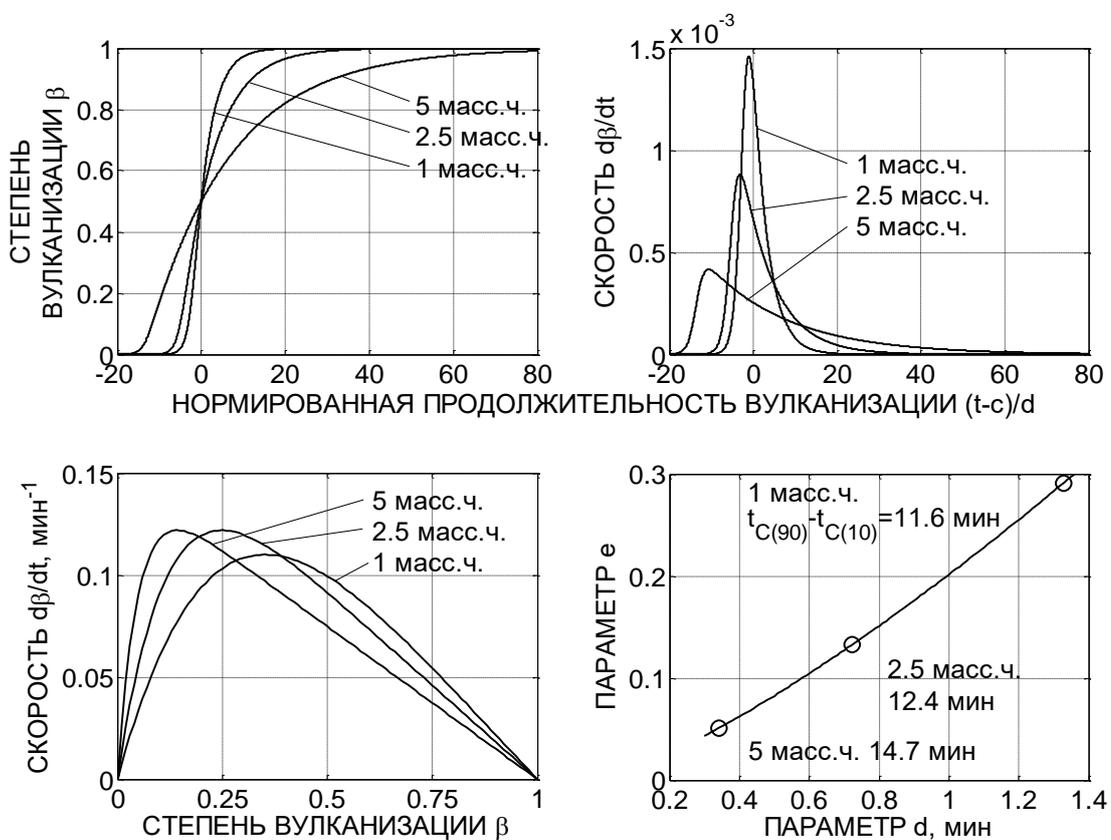


Рисунок 42. Влияние уровня содержания структурирующего агента на основные параметры процесса структурирования эластомерного композита

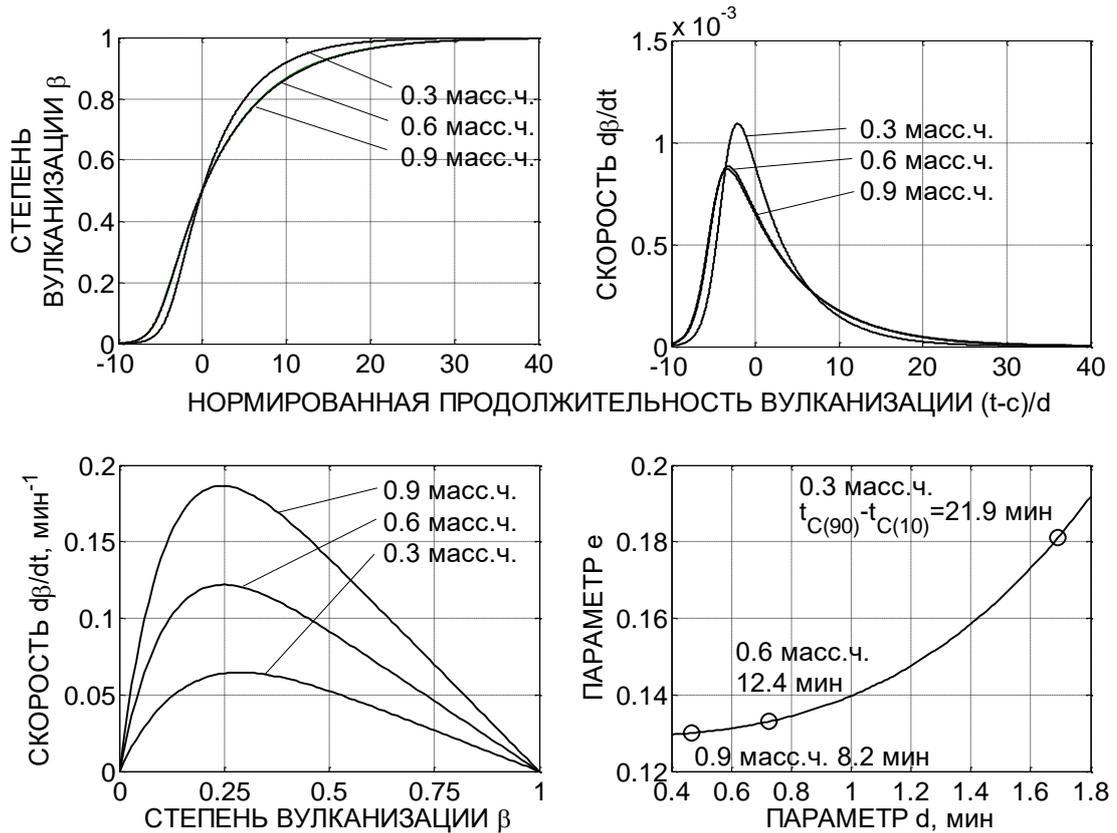


Рисунок 43. Влияние уровня содержания ускорителя структурирующего агента на основные параметры процесса структурирования эластомерного композита

Из приведенных графиков на рисунках 41-43 и в приложении 2 видно, что дифференциальные кривые скорости процесса структурирования оказываются более чувствительными к изменению уровней рецептурно-технологических факторов, что согласуется с литературными данными. Повышение содержания структурирующего агента приводит к увеличению скорости процесса при равных степенях структурирования (рисунок 42). Та же тенденция наблюдается и в случае активатора процесса структурирования, причем проявляется более заметно (рисунок 43).

4.5. Выводы

1. Показано, что коэффициенты корреляции для основных вулканизационных характеристик, найденные при анализе смесей на основе натурального каучука, значительно ниже, чем для синтетических.

2. Показано, что кривые скорости процесса структурирования эластомерных композитов оказываются более чувствительными к изменению уровней технологических факторов, чем реограммы состояния.

3. Показано, что кривые скорости процесса структурирования эластомерных композитов оказываются более чувствительными к изменению уровней рецептурных факторов, чем реограммы состояния.

4. На большом массиве данных (158 реограмм) исследована взаимосвязь кинетических параметров процесса вулканизации, характеризующих как степень вулканизации, так и динамику изменения скорости процесса.

5. Показано, что зависимость степени вулканизации от температуры обработки носит экстремальный характер.

6. Установлено, что варьирование дозировок наполнителя и пластификатора незначительно влияет на интегральные и дифференциальные характеристики процесса при оценке скорости и степени структурирования.

7. Установлено, что влияние содержания ускорителя структурирования и структурирующего вещества на основные вулканизационные характеристики проявляется наиболее заметно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный в диссертационной работе комплекс исследований и практических разработок ориентирован на алгоритмическо-информационное обеспечение автоматизированной системы управления химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов с учетом отраслевой специфики производства продукции из эластомеров.

В работе получены следующие новые практически значимые результаты:

Создано математическое, информационное и алгоритмическое обеспечение системы обработки реометрической информации для управления технологическими процессами структурирования эластомерных композитов.

Разработаны комплекс моделей и структура информационной базы данных реограмм состояния для обеспечения функций оперативного контроля и принятия решений по управлению и корректировке процессов структурирования эластомерных композитов.

ГЛОССАРИЙ ОСНОВНЫХ ТЕРМИНОВ И ПОНЯТИЙ

Алгоритм - это набор инструкций, описывающих порядок действия для достижения требуемых результатов к управлению обращением или оценки воздействия на окружающую среду химических веществ.

Автоматизированная информационная система - совокупность программно-аппаратных средств, предназначенных для автоматизации деятельности, связанной с хранением, передачей и обработкой информации.

Структурирование – химический и технологический процесс получения из пластичной резиновой смеси прочного и эластичного композиционного материала

Реограмма состояния – графическое отображение процесса структурирования эластомерного композита, вычерчиваемое реометром.

Реометр – прибор для определения характеристик процесса структурирования эластомерного композита.

Уровень рецептурного фактора – массовое содержание ингредиента в композите, используемое для управления процессом структурирования.

Технологический фактор – управляемый параметр процесса структурирования эластомерного композита (температура, давление, время обработки, а также уровень технологических свойств)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уральский М.Л., Горелик Р.А., Буканов А.М. Контроль и регулирование технологических свойств резиновых смесей. – М.: Химия, 1983. – 128 с.
2. Махлис Ф.А., Федюкин Д.Л., Терминологический справочник по резине. – М.: Химия, 1989. – 400 с.
3. Догадкин Б.А., Донцов А.А., Шершнева В.А. Химия эластомеров. – М.: Химия, 1981. – 376 с.
4. Корнев А.Е., Буканов А.М., Шевердяев О.Н. Технология эластомерных материалов. – М.: Эксим, 2000. – 288 с.
5. Лукомская А.И., Баденков П.Ф., Кеперша Л.М. Расчеты и прогнозирование режимов вулканизации резиновых изделий. – М.: Химия, 1978. – 280 с.
6. Спутник резинщика / Под ред. Л.М. Горбунова. – Л.: Госхимиздат, 1932. – 464 с.
7. Дж. Р. Скотт Физические испытания каучука и резины. – М.: Химия, 1968. – 316 с.
8. Вулканизация эластомеров: Пер. с англ. / Под ред. Г. Аллигера, И. Съетуна. – М.: Химия, 1967. – 355 с.
9. Кашкинова Ю.В. Количественная интерпретация кинетических кривых процесса вулканизации в системе организации рабочего места технолога - резинщика: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2005. – 24 с.
10. Наумова Ю.А. Синергические системы в многокомпонентных эластомерных материалах: идентификация, анализ, формирование: автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Москва, 2013. – 44 с.
11. Агаянц И.М. Азы статистики в мире химии. – М.: Изд. МИТХТ. 2012. – 441 с.
12. Агаянц И.М., Наумова Ю.А., Кузнецов А.С. Анализ корреляционных соотношений в области реометрических исследований резин./ Вестник МИТХТ, 2013 г., т. 8 № 1., с 15–19.
13. Агаянц И.М. Натуральный каучук, в поисках рецепта. – М.: ПЦ.

«Петергоф», 2010. – 701 с.

14. Сочнев А.Н. Автоматизированная система управления вулканизационными характеристиками резиновой смеси в производстве резинотехнических изделий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Саратов, 2008. – 20 с.

15. Агаянц И. М., Пять столетий каучука и резины. – М.: Модерн, 2002. – 432 с.

16. Новаков И.А., Новопольцева О.М., Кракшин М.А. Методы оценки и регулирования пластоэластических и вулканизационных свойств эластомеров и композиций на их основе. – М.: Химия, 2000. – 240с.

17. ГОСТ 10722-84 Резина. Метод определения вязкости и способности преждевременной вулканизации.

18. ASTM D1646-99 Standard Test Methods for Rubber - Viscosity, Stress Relaxation, and Pre-Vulcanization Characteristics (Mooney Viscometer) ASTM International 10-May-1999 11 pages

19. Орловский П.Н., Лукомская Аж.И., Цыдзик М.А., Богатова С. К. Оценка технологических свойств сажевых резиновых смесей на сдвиговом пластометре // Каучук и резина, №7, 21(1960).

20. Peter J. and Heidemann W. A new method for determining the optimum cure of rubber compounds, Kautschuk und Gummi 11, 159 (1958).

21. Blow C. M. Rubber technology and manufacture. Insitytion of rubber Industry, 1971, 527 p.

22. More A. R., Morell S. H., and Payne A. R., Rubber J. Int. Plast. 136,858 (1959).

23. Claxton W. E., Conant F. S. and Liska J. W. Evaluation of progressive ϕ changes in elastomer properties during vulcanization. // Rubber Chem. Technol. 34, 777 (1961).

24. Decker G. E., Wise R. W., and Guerry D., Rubber World 147(3), 68 (1962); Rubber Chem. Technol. 36, 451 (1963).

25. Juve A. E., Karper P. W., Schroyer L. O., and Veith A. G., Rubber World, 149 (Dec.), 43 (1963).

26. Вострокнутов Е. Г., Прозоровская Н. В., Кирилюк Л. В. // Производство шин, РТИ и АТИ. – 1971. - №6. – С.12-15.
27. ГОСТ 12535-84. Смеси резиновые. Метод определения вулканизационных характеристик на вулканометре.
28. ASTM Standard 2084—93, Standard Test Method for Rubber Property — Vulcanization Using Oscillating Disk Cure Meter, Appendix X2, History of the Oscillating Disk Cure Meter, Section X2.6 and Table X2.1.
29. JS ISO 3417-78. Row Rubber Measurement of Cure Characteristics with the Oscillating Curometer.- 1981.
30. ISO 6502 Rubber—Measurement of vulcanization characteristics with rotorless curemeters. Second edition, 1991.
31. Мак-Келви Д. М. Переработка полимеров: Пер. с англ. – М.: Химия, 1968. – 496 с.
32. Приборы и методы оценки свойств резиновых смесей, перерабатываемых литьем под давлением / Галле А. П., Конгаров Г. С., Федоров Е. Г. Поздрашенкова Г.И. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1981. -76 с.
33. Алфрей Т. Механические свойства высокополимеров: Пер. с англ. – М.: 1982. – 320 с.
34. Monsanto Rheometer 100, Description and application. Technical Bulletin No IS-1, p. 18.
35. Подалинский А.В., Юрчук Т. Е. Об оценке стандартности каучука СКИ-3 методом вулканометрического анализа // Каучук и резина. – 1983. - №9. –С.23-26.
36. Kato H., Fujuta H/// Rubber Chemical and Technology / 1971. –V. 48,№1. – p.19-25.
37. Резцова Е.В., Виленц Ю: Е. Влияние технологических факторов переработки резиновых смесей на основе СКИ-3 и СКМС-3ОАРКМ-15 на кинетику их вулканизации и динамические характеристики резин.// Каучук и резина. 1971. -№12. - с.15-18.
38. Anand R., Blacly D.C., Lee K.S. Correlation between Monsanto reometer

torque and concentration of crosslinks for elastomers networks. International Rubber Conference «Rubbercone», 1982 June 2-4.

39. Вольфсон С. Л, Горелик В. М. Кучерский А. М. Определение модуля сдвига эластомеров на вулканометрах с биконическим ротором // Каучук и резина.- 1977.-№6.- С. 57-59.

40. Вольфсон Б. Л.. Горелик Б. М. Определение условно-равновесного модуля резин на вулканометрах с биконическим ротором // Каучук и резина.- 1977.- №1.- С. 55-57.

41. Чарлсби А. Ядерные излучения и полимеры: Пер. с англ. – М.: Издательский центр «Издательство «ИЗДАТЕЛЬСТВО», 1962. – 210 с

42. Подалинский А. В. Федоров Ю. Н. Изучение температурной зависимости скорости вулканизации альтернатного сополимера бутадиена с пропиленом // Каучук и резина, – 1982.- №2.- С. 16-18.

43. Догадкин Б. А. Химия эластомеров. – М.: Химия, 1972. – 381 с.

44. Юровски В., Кубис Е. Метод определения- параметров процессов структурирования и деструкции резины при вулканизации //Каучук и резина.- 1980.-№8.-С.60-61.

45. <http://www.goettfert.com/index.html>

46. Мак Кейб К. Усиление эластомеров: Пер. с англ. / Под ред. Дж-Крауса. – М.: 1968. – С. 188-200.

47. Печковская К. А. Сажа как усилитель каучуков. – М.: Химия, 1968. – 215с.

48. Leblanc J. L. //Kautschuk und Gummi Kunststoffe.-1996.-№4.- S.256-258.

49. Захаренко Н.В., Козоровицкая Е.И. Палкина Ю.З., Суздальницкая Ж.С. Способы оценки свойств резиновых смесей. ЦНИИТЭнефтехим; серия: производство РТИ и АТИ. Выпуск №3 – 1988 г., 52 стр.

50. Шевчук В.П., Кракшин М.А., Делаков Е.П., Терехова Е.А. Автоматизированное рабочее место разработчика рецептуры в производстве РТИ // Каучук и резина. 1987. №2.-с. 41-42.

51. Сарле Х., Х.. Вандорен П., Вингриф С.М. Миникомпьютер для

технологов резинщиков // Междунар. конф. по каучуку и резине. – М., 1984.- С.39.- (Препринты).

52. Смит М. А., Роебух Х. Современный контроль качества резиновых смесей.// Междунар. конф. по каучуку и резине.- М., 1984.- С.51.- (Препринты).

53. Агаянц И.М., Люсова Л.Р., Кузнецов А.С., Третьякова Н.А. «Прочность связи в резинокордной системе. Оптимизация количественного состава клеевой композиции с помощью методов математического моделирования» / Промышленное производство и использование эластомеров 2011г. № 4., с.43.

54. Агаянц И.М., Люсова Л.Р., Кузнецов А.С., Третьякова Н.А., Наумова Ю.А. «Создание тепло-, маслостойких клеевых композиций для резинокордных изделий» / Каучук и Резина 2012г. №4 с.27

55. Кузнецов А.С. Модификация осей координат при количественной интерпретации реометрических кривых / И.М. Агаянц, А.С. Кузнецов, Н.Я. Овсяников // Тонкие химические технологии. – 2015. – № 2, – с. 67–70.

56. Кузнецов А.С. Информационная поддержка системы управления технологическим процессом структурирования эластомерных систем с применением реометрических кривых / В.Ф. Корнюшко, И.А. Гончаров, И.М. Агаянц, // Прикладная информатика – 2016. – № 2 – с.5-12.

57. Кузнецов А.С. Процессы смешения и структурирования эластомерных систем как объекты управления в химико-технологической системе / А.С. Кузнецов, В.Ф. Корнюшко // Международный научно-исследовательский журнал – 2016. – № 4, с. 120-123.

58. Кузнецов А.С. Модификация осей координат при количественной интерпретации реометрических кривых. II Анализ взаимосвязей параметров моделей и вулканизационных характеристик / И.М. Агаянц, А.С. Кузнецов, В.Ф. Корнюшко // Международный научно-исследовательский журнал – 2016. – № 5, с. 18-23.

59. Кузнецов А.С. «Влияние содержания графита на комплекс свойств электропроводных резиновых смесей и резин на основе скмс-30аркм-15»

/Сборник статей победителей 62-й Научно-технической конференции студентов МИТХТ им. М.В. Ломоносова 2010г. Москва. С. 185

60. Агаянц И.М., Люсова Л.Р., Кузнецов А.С., Третьякова Н.А. «Оптимизация количественного состава клеевой композиции на основе полихлоропрена» / тезис. Материалы научно-практической конференции Резиновая промышленность. Сырье. Материалы. Технологии. 24-28 мая 2010 г. Москва. С.327

61. Агаянц И.М., Люсова Л.Р., Кузнецов А.С., Дорохова Т.Н. «Исследования модифицированных клеев на основе бутадиен-стирольных термоэластопластов» / Материалы научно-практической конференции Резиновая промышленность. Сырье. Материалы. Технологии. 24-28 мая 2012 г. С. 37

62. Агаянц И.М., Люсова Л.Р., Кузнецов А.С., Фалеев А.Г. «О применении систем промоторов адгезии в клеях на основе бутадиен-стирольных термоэластопластов» / Дзержинск-2013 издательство ФГУП НИИ полимеров, с.121

63. Агаянц И.М., Люсова Л.Р., Кузнецов А.С. «О способах направленного изменения свойств клеев на основе бутадиен-стирольных термоэластопластов» / сборник тезисов докладов научно-технической конференции Научно-технические химические технологии - 2013 (НХТ - 2013), с.126

64. Kuznetsov A.S., Agayants I.M. «Creating the adhesives with enhanced characteristics on the base of butadiene-styrene thermoplastic elastomers» \ XV International Scientific Conference «High-Tech in Chemical Engineering – 2014»

65. Кузнецов А.С. Реограмма как инструмент управления технологическим процессом структурирования эластомерных систем / Кузнецов А.С., Агаянц И.М., Корнюшко В.Ф. // Научно-технические химические технологии - 2015 : сб. тр. науч.-практ. конф. – М. : Изд-во МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 2015. – с. 143.

66. 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.

67. Кузнецов А.С. Информационная поддержка системы управления технологическим процессом структурирования эластомерных систем / Кузнецов А.С., Корнюшко В.Ф. // Российско-американская научная школа-конференция «Моделирование и оптимизация химико-технологических процессов» : сб. тр. науч.-практ. конф. – Казань, 2016. – с. 35.

68. Кузнецов А.С. Применение методов и процедур системного анализа при описании систем производства эластомерных материалов // 6-я международная конференция «Проблемы и перспективы современной науки» : сб. тр. межд. науч.-практ. конф. – М.: 2016. – с.22–26.

69. Кузнецов А.С. Информационная система поддержки принятия управленческих решений на производстве эластомерных материалов / Кузнецов А.С., Корнюшко В.Ф. Национальная ассоциация ученых (НАУ) № 5 (21), 2016 / ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ: сб. тр. межд. науч.-практ. конф. – М.: 2016. – с.34-35.

70. Kuznetsov A.S., Kornushko V.F. Information support of elastomeric systems structuring processes / XVI International Scientific conference “High-Tech in chemical engineering - 2016” , p. 40

71. Кузнецов А.С. Применение методов системного анализа при описании процессов структурирования на химико-технологических системах производства продукции из эластомерных композитов / Сборник статей международной исследовательской организации "Cognitio" по материалам XV международной научно-практической конференции: «Актуальные проблемы науки XXI века», г. Москва, 31.10.2016 г. С.86

72. Кузнецов А.С. Расчет устойчивых статистических характеристик процессов структурирования эластомерных систем / Кузнецов А.С., Корнюшко В.Ф., Агаянц И.М. VI Всероссийская конференция с международным участием «Актуальные вопросы химической технологии и защиты окружающей среды», г. Чебоксары, 24-25 ноября 2016 г., с.134.

73. Давлетбаева Л. Ф. Жизненный цикл товара // Вестник ОГУ. 2010. №13 (119). URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/zhiznennyu-tsikl-tovara> (дата обращения: 15.01.2017).

74. Карпов Дмитрий Владимирович Проблемы внедрения ERP-систем // Вестник ННГУ. 2010. №4. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/problemy-vnedreniya-erp-sistem> (дата обращения: 15.01.2017).

75. Кошарский Б.Д. Автоматические приборы, регуляторы и вычислительные системы. Справочное пособие. Л., Машиностроение, 1976 г. – 488 с.

76. Бернштейн А.В., Кулешов А.П. Когнитивные технологии в компьютерных системах проектирования и анализе данных. III Международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии и ИТ-образование». МГУ им. Ломоносова, 6 - 9 декабря 2008 г., Москва

77. Столбов Л.А. Системы информационного обеспечения при создании проблемно ориентированной базы данных с применением когнитивного моделирования /Столбов Л.А., Дубавов Д.С., Филоретова О.А., Лисица А.В. – Научно-практический межотраслевой журнал Интеграл, №1, 2013 г. С.52-53.

78. Харламов А. А. Технология автоматического смыслового анализа текстов TextAnalyst // Вестник МГЛУ. 2014. №13 (699). URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-avtomaticheskogo-smyslovogo-analiza-tekstov-textanalyst> (дата обращения: 15.01.2017).

79. Темкин И. О. Принципы построения интеллектуальных систем управления горно-технологическими процессами // ГИАБ. 1996. №3. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/printsiipy-postroeniya-intellektualnyh-sistem-upravleniya-gorno-tehnologicheskimi-protssami> (дата обращения: 15.01.2017).

80. Темкин И. О., Бондаренко И. С., Гончаренко С. Н., Чан Нгок Фу Компьютерные методы анализа экологической безопасности проектов строительства коммуникационных тоннелей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. №11-1. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/kompyuternye-metody-analiza-ekologicheskoy-bezopasnosti-proektov-stroitelstva-kommunikatsionnyh-tonneley> (дата обращения: 15.01.2017).

81. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход, 2007.- 1407 с

82. Рыбина Г.В. Основы построения интеллектуальных систем. – М.: Финансы и статистика, 2010. – 432 с.
83. Построение экспертных систем: Пер. с англ./ Под ред. Ф. Хейеса-Рота, Д. Уотермана, Д. Лената.- М.: Мир, 1987.- 441 с.
84. Хант Э. Искусственный интеллект: Пер. с англ./ Под ред. В. Л. Стефанюка.- М.: Мир, 1978.- 558 с.
85. Савельев А. Н. Построение продукционной базы знаний с использованием адаптивной нейронной сети // Вестник АГТУ. 2007. №1. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-produktsionnoy-bazy-znaniy-s-ispolzovaniem-adaptivnoy-neyronnoy-seti> (дата обращения: 15.01.2017).
86. Самойлова Е.М. Построение экспертной системы поддержки принятия решения как интеллектуальной составляющей системы мониторинга технологического процесса // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2016. №2 С.128-142.
87. Monsanto Accelerator Rheographs, Brussels, 1987; Measuring visco-elastic properties using the MDR 2000 rheometer, Louvain-la-neuve, 1989. – 20 p.
88. Новаков И.А., Вольфсон С.И., Новопольцева О.М., Кракшин М.А. Реологические и вулканизационные свойства эластомерных композиций. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2008. – 332 с.
89. Мешалкин В.П., Экспертные системы в химической технологии. - М.: Химия, 1995. – 367 с.
90. Темкин И.О., Клебанов Д.А., Куляница А.Л., Мезенцев В.К. Принципы и модели интеллектуального управления роботизированными объектами горно-транспортного комплекса карьера. Горный информационно-аналитический бюллетень, 2016. Специальный выпуск, с.233-242.
91. Темкин И.О., Фомичева О.Е. Предприятие как инструментальное средство создания обучающих систем, основанных на знаниях. Сборник трудов 16- международной научно-практической конференции «Новые информационные технологии в образовании», Москва, ООО «1С-Публишинг», Часть 1, с.437-440

92. Temkin I.O., Leontyeva A.V., Konov I.S. Forecasting of university development on the basis of multi-agent modelling of rating dynamics. Proceedings of BRICS Global University Summit, session “Information Technologies for Modelling Socio-Economic and Industrial Systems”, Moscow, MISIS, 2016, с.39-47

93. Темкин И.О. Бондаренко И.С. Гончаренко С.Н., Чан Нгок Фу Компьютерные методы анализа экологической безопасности проектов строительства коммуникационных тоннелей. Известия ТГУ Технические науки, Тула, 2015 Выпуск 11, Часть 1, с. 203-215.

94. Temkin I.O. Kulyanitsa A.L., Kubrin S.S. Application of intellectual system for robotic coal plough machine control. MINER'S WEEK - 2015 REPORTS OF THE XXIII INTERNATIONAL SCIENTIFIC SYMPOSIUM. Moscow, 2015, NUST MISIS, p.278-284.

95. Темкин И.О., Кубрин С.С. и др. Использование интеллектуальных систем управления роботизированными очистными комплексами в сложных горно-геологических условиях. Горный информационно-аналитический бюллетень, 2015. Специальный выпуск, с. 294-302.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ВЫВОД СООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ
ПАРАМЕТРАМИ МОДЕЛЕЙ И ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПРОЦЕССА
СТРУКТУРИРОВАНИЯ**

$$\frac{1}{\beta} = 1 + \exp\left(-\frac{t-c}{d}\right); \frac{1}{\beta} - 1 = \exp\left(-\frac{t-c}{d}\right) \quad \frac{1-\beta}{\beta} = \exp\left(-\frac{t-c}{d}\right); \frac{\beta}{1-\beta} = \exp\left(\frac{t-c}{d}\right).$$

$$\ln\left(\frac{\beta}{1-\beta}\right) = \frac{t-c}{d}; t = c + d \times \ln\left(\frac{\beta}{1-\beta}\right); t_{90} = c + d \times \ln\left(\frac{0.9}{0.1}\right) = \tilde{n} + d \times \ln 9 = c - d \times \ln \frac{1}{9}.$$

$$t_{10} = c + d \times \ln\left(\frac{0.1}{0.9}\right) = c + d \times \ln \frac{1}{9} = c - d \times \ln 9. \quad t_{90} - t_{10} = d \times (\ln 9 - (\ln 1 - \ln 9)) = \frac{d}{2} \times \ln 9$$

$$; \frac{\Delta t}{1.5} = \frac{1}{2 \times \ln 9} \quad 4.39 = \frac{1}{2 \ln 9}; 1.5 \times \ln 9 = t - 10; t = 10 + 1.5 \times \ln 9 \quad \frac{0.9}{0.1} = \exp\left(\frac{t-10}{1.5}\right)$$

$$t_{90} - t_{10} = d \times 2 \times \ln 9 = 4.3944 \times d.$$

$$\beta = \frac{1}{1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d}; \frac{1}{\beta} - 1 = \left(\frac{c}{t}\right)^d = \frac{1-\beta}{\beta}; \frac{1}{\beta} = 1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d; \left(\frac{1-\beta}{\beta}\right)^{\frac{1}{d}} = \frac{c}{t}; t = \frac{c}{\left(\frac{1-\beta}{\beta}\right)^{\frac{1}{d}}}$$

$$t_{10} = \frac{c}{\left(\frac{1}{9}\right)^{\frac{1}{d}}}; t_{50} = c; t_{90} = \frac{c}{\left(\frac{1}{9}\right)^{\frac{1}{d}}} = c \times 9^{\frac{1}{d}}; t_{90} - t_{10} = c \times 9^{\frac{1}{d}} - \frac{c}{\left(\frac{1}{9}\right)^{\frac{1}{d}}} = c \times \left(9^{\frac{1}{d}} - 9^{-\frac{1}{d}}\right)$$

$$\beta = 1 - \left(1 + \exp\left(\frac{t+d \cdot \ln(2^{1/e} - 1) - c}{d}\right)\right)^{-e}; 1 - \beta = \left(1 + \exp\left(\frac{t+d \cdot \ln(2^{1/e} - 1) - c}{d}\right)\right)^{-e}.$$

$$\frac{1}{\beta} = \left(1 + \exp\left(\frac{t+d \cdot \ln(2^{1/e} - 1) - c}{d}\right)\right)^e; \left(\frac{1}{1-\beta}\right)^{\frac{1}{e}} = \left(1 + \exp\left(\frac{t+d \cdot \ln(2^{1/e} - 1) - c}{d}\right)\right).$$

$$\left(\frac{1}{1-\beta}\right)^{\frac{1}{e}} - 1 = \exp\left(\frac{t+d \cdot \ln(2^{1/e} - 1) - c}{d}\right);$$

$$d \times \ln \left(\left(\frac{1}{1-\beta} \right)^{\frac{1}{e}} - 1 \right) = t + d \times \ln \left(2^{\frac{1}{e}} - 1 \right) - c$$

$$t = d \times \ln \left(\left(\frac{1}{1-\beta} \right)^{\frac{1}{e}} - 1 \right) - d \times \ln \left(2^{\frac{1}{e}} - 1 \right) + c \quad t = d \times \frac{\ln \left(\frac{1}{1-\beta} \right)^{\frac{1}{e}} - 1}{2^{\frac{1}{e}} - 1} + c.$$

$$t_{50} = c; \quad t_{10} = d \times \frac{\ln \left(\frac{10}{9} \right)^{\frac{1}{e}} - 1}{2^{\frac{1}{e}} - 1} + c; \quad t_{90} = d \times \ln \frac{10^{\frac{1}{e}} - 1}{2^{\frac{1}{e}} - 1} + c$$

$$t_{90} - t_{10} = d \cdot \ln \left(\frac{10^{1/e} - 1}{10^{1/e} - 9^{1/e}} \right) + \frac{d}{e} \cdot \ln 9.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ СОДЕРЖАНИЯ РЕЦЕПТУРНОГО ФАКТОРА НА ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА СТРУКТУРИРОВАНИЯ

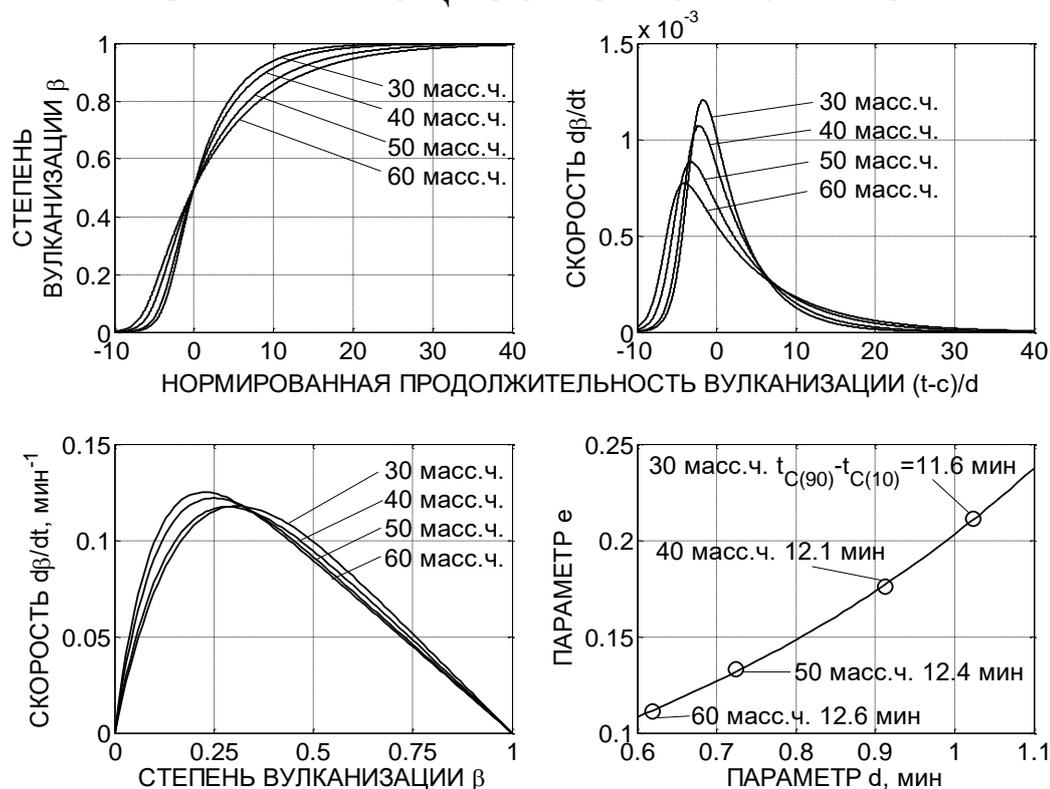


Рисунок 44. Влияние уровня содержания наполнителя на основные параметры процесса структурирования эластомерного композита

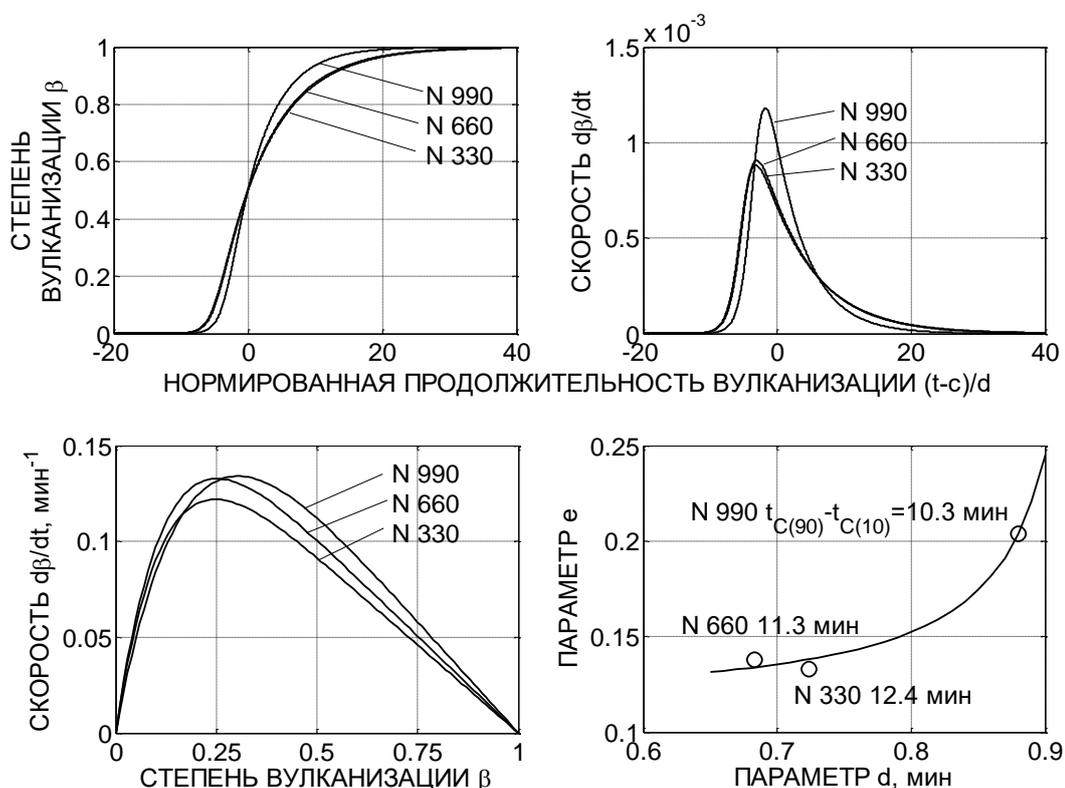


Рисунок 45. Влияние типа наполнителя на основные параметры процесса структурирования эластомерного композита

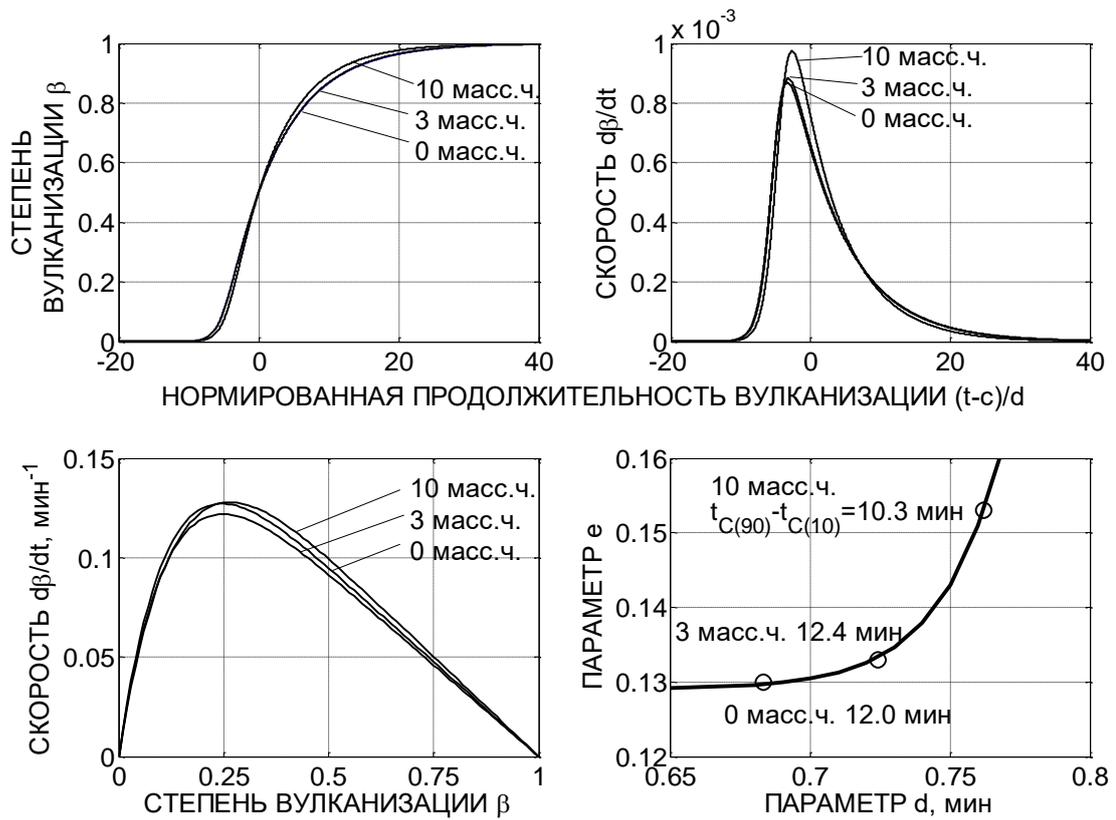


Рисунок 46. Влияние уровня содержания пластификатора на основные параметры процесса структурирования эластомерного композита