



**КУЗНЕЦОВ АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ**

**АЛГОРИТМИЧЕСКО-ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМНОГО  
АНАЛИЗА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ  
ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ**

Специальность 05.13.01  
Системный анализ, управление и обработка информации  
(химическая технология)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» в институте тонких химических технологий (МИТХТ) на кафедре «Информационные системы в химической технологии»

Научный руководитель:

**Корнюшко Валерий Федорович**, доктор технических наук, Заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры «Информационные системы в химической технологии» ФГБОУ ВО «Московский технологический университет»

Официальные оппоненты:

**Краснов Андрей Евгеньевич**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАУ ГНИИ ИТТ «Информика», главный научный сотрудник.

**Темкин Игорь Олегович**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», заведующий кафедрой «Автоматизированные системы управления».

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО Ивановский государственный химико-технологический университет

Защита состоится 7 ноября 2017 года в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 212.204.16 при РХТУ им. Д.И. Менделеева (125047 г. Москва, Миусская пл., д. 9) в конференц-зале (ауд. 443).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева и на сайте <http://diss.muctr.ru/author/203/>

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.204.16

Дударов С.П.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время большинство изделий из эластомерных материалов получают в процессе структурирования, что представляет собой химический процесс пространственного сшивания и технологический процесс создания готового изделия из эластомеров.

Современное промышленное производство изделий из эластомеров – сложный многостадийный процесс, характеризующийся наличием нескольких стадий. В общем виде система производства изделий из эластомеров представляет собой пример химико-технологической системы с последовательным соединением элементов.

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.

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.

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, M.Д. Месаровић, D. Маско, 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 алгоритмического-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 алгоритмического-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 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 смещения 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 географической информации, организации ее хранения и передачи.
6. разработать архитектуру интеллектуальной базы знаний для управления процессами структурирования эластомерных композитов, на основе данных анализа географической 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 исследованием 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 – дистрибьюция продукции из эластомерных композитов на основе интегрированных 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 отличает, от использованных 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 отличает от использованных 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. Интеллектуальная автоматизированная система управления химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов применялась 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 системы по автоматизированному 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: «Научное химическое 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 15 работ, в том числе 7 статей в изданиях из перечня ВАК.

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

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

В диссертации рассмотрен комплекс теоретических и прикладных вопросов.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, изложены научная новизна и практическая ценность результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены структура диссертации и перечень вопросов, рассматриваемых в главах и приложениях.

**В первой главе** приведен развернутый анализ литературных источников. Рассмотрены производственный процесс и технология производства продукции из эластомерных композитов. Эластомерный композиционный материал (резина) рассмотрен как сложная многокомпонентная система. Описана химико-технологическая система производства изделий из эластомеров. Рассмотрено последовательное превращение

каучука и ингредиентов в полуфабрикат и потом в готовый продукт. Проведен системный анализ управления жизненным циклом продукции из эластомерных композитов. (Рис. 1.)

Представлена схема реализации системного подхода к управлению полным циклом разработка – производство – дистрибьюция продукции из эластомерных композитов. Важно отметить, что разработанные в настоящее время функциональные блоки интегрированных 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.

Приведено описание основной методики, используемой для контролирования процесса и оценки вулканизационной способности эластомерных композитов – метода вибрационной реометрии. Рассмотрена физическая сущность метода, приведены стандарты на испытания образцов. Дана характеристика реометрических кривых трех типов. Приведен весь необходимый набор информации, которую можно извлечь путем анализа реометрических кривых. Обозначены основные точки на реометрической кривой. Приведены формулы для расчета основных вулканизационных характеристик процессов структурирования. Показаны возможности использования результатов реометрических испытаний, позволяющие более полно охарактеризовать и прогнозировать технологические свойства резиновых смесей и свойства изделий. Показано, что реометр можно рассматривать как объект физического моделирования при описании процессов структурирования эластомерных композитов. Проведен анализ современных научных исследований в области создания тренажерно-обучающих комплексов по управлению сложными химико-технологическими процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов.

В соответствии с целью работы и на основании выводов, сделанных в результате анализа литературы, сформулирована постановка задачи, и намечены этапы ее решения.

**Во второй главе** проанализированы химико-технологические системы производства изделий из эластомерных композитов как объекты системного анализа и математического моделирования, а также разработана математическая модель реограммы состояния. В работе предлагается формализация дифференциальной кривой скорости процесса структурирования эластомерных композитов как функции распределения независимых случайных величин, а также вычисление статистических моментов распределения.

Математическая модель, отражающая основной показатель процесса – степень вулканизации  $\beta$ , находится из физико-химических соотношений и имеет вид:

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

Здесь параметр  $a$  с учетом воспроизводимости реограмм состояния 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  $t_{C(50)}$ . Параметры  $d$  и  $e$  связаны между собой и с вулканизационными характеристиками.

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

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

Скорость вулканизации определяется соотношением:

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

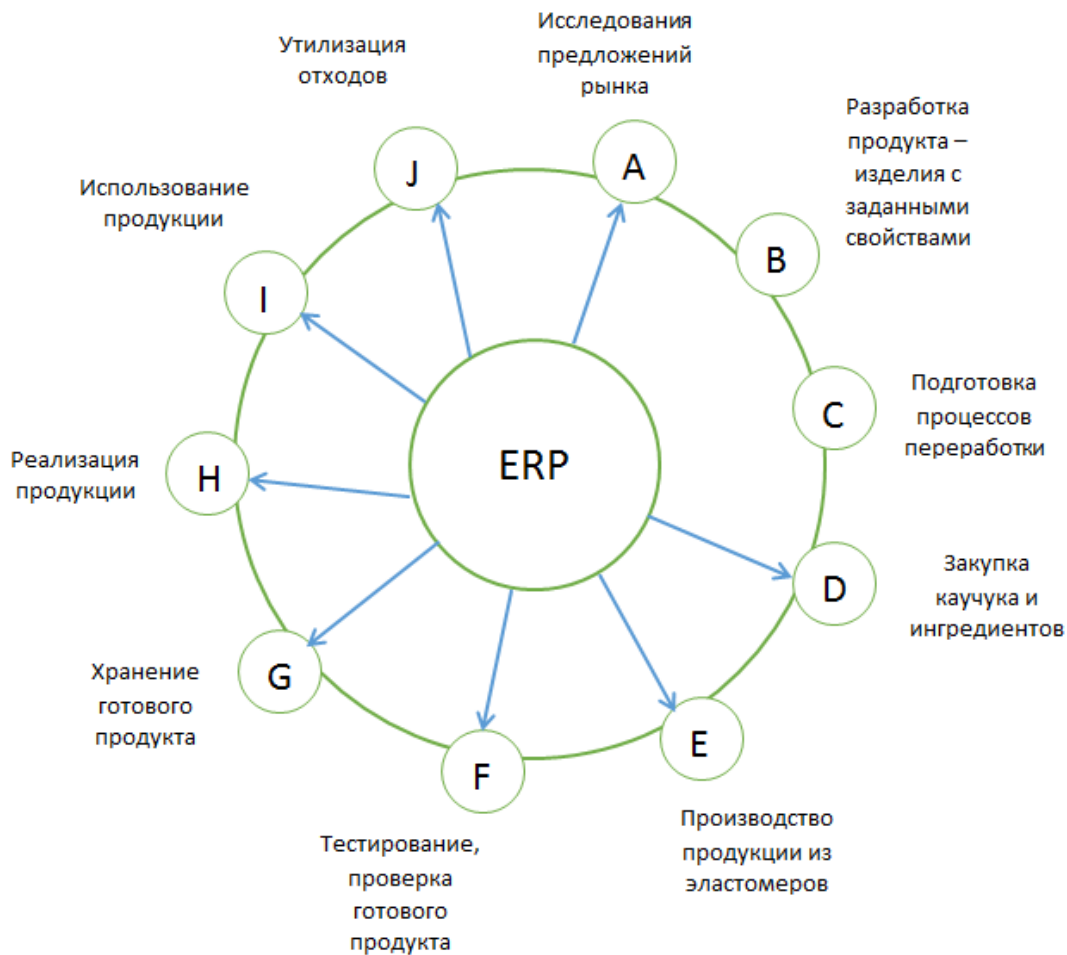


Рис. 1. Система управления на основе интегрированной информационной системы ERP жизненным циклом разработки, производства и дистрибьюции продукции из эластомерных композитов.

Ускорение процесса выражается следующей формулой:

$$\frac{d^2 \beta}{dt^2} = \frac{1}{d} \cdot ((e+1) \cdot (1-\beta)^{1/e} - e) \cdot \frac{e}{d} \cdot (1-\beta) \cdot (1-(1-\beta)^{1/e}). \quad (4)$$

Формально рассматривая кривые скорости как функции распределения случайных величин, можно провести статистический анализ, включающий расчет моментов (амплитудный анализ) (рис. 2).

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

Помимо определения вулканизационных характеристик по реометрической кривой целесообразно рассчитывать для оценки кривой скорости амплитуду ( $A$ ), моду ( $Mo$ ) и четыре перечисленных выше момента.

Первым шагом на пути создания интеллектуальных систем управления является анализ информационных потоков в химико-технологических системах, моделируемых методом функционального моделирования с помощью логико-информационных моделей.

Были разработаны семантическая и логико-информационная модель процесса структурирования эластомерных композитов.

В общем виде семантическую модель процесса структурирования можно свести в таблицу (Рис. 3.), 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 ( $D_1, D_2, D_3$ ), а также указаны исполнители ( $И_1, И_2, И_3$ ).



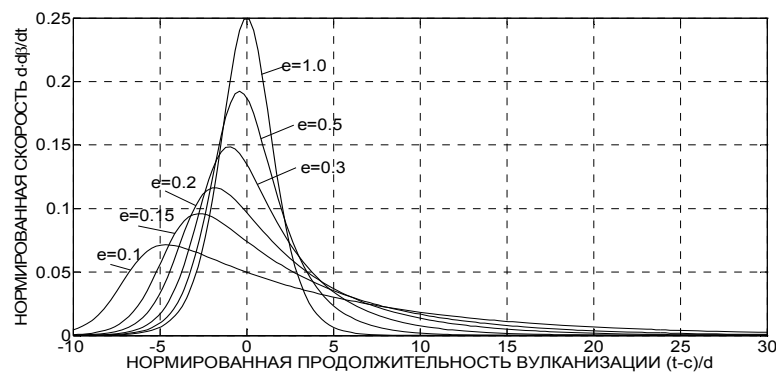


Рис. 2. Иллюстрация кривых скорости процесса структурирования эластомерного композита.

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

Установление параметров изготовления резиновой смеси (Ф1) производится вальцовщиком (И1) по контрольным картам (Д1), где содержатся необходимые значения параметров процесса.

Контроль качества полуфабриката (сырой смеси) (Ф1) проводится специалистами центральной заводской лаборатории (ЦЗЛ) (И2) завода-изготовителя по паспорту смеси (Д2).

Функции	Документы	Исполнители
Ф1 – определение параметров производства резиновой смеси, Ф2 – контроль качества смеси, Ф3 – оценка и контроль вулканизационных характеристик смеси, Ф4 – контроль свойств готового изделия, выявление брака	Д1 – карта производства смеси, Д2 – паспорт смеси, Д3 – паспорт смеси, данные виброреометрии, Д4 – паспорт смеси, данные физико-механических испытаний	И1 – вальцовщик, И2 – специалист ЦЗЛ, И3 – специалист-технолог, И4 – специалист отдела контроля качества готовой продукции

Рис. 3. Семантическая модель процесса структурирования эластомерных композитов.

Процедура оценки вулканизационных характеристик (Ф3) проводится технологом (И3) по паспорту смеси и данным реометрических испытаний (Д3).

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

Далее в главе описано построение информационной модели процесса структурирования эластомерных композитов, необходимых для контроля и управления процессом и использования ее как основы информационной поддержки принятия управленческих решений.

Для управления технологическим процессом структурирования эластомерных композитов используются экспертные решения, принимаемые на основе анализа реограмм состояния. Для выбора управляющих параметров и оценки их влияния на характеристики получаемых смесей были построены информационные модели процесса.

Функционально-технологическая модель производства изделий из эластомеров позволяет формализовать детальный анализ последовательного преобразования ресурсов в готовую продукцию усилиями различных исполнителей на основе различных регламентирующих документов. Анализ полученных диаграмм позволяет выделить ряд характерных особенностей технологического процесса структурирования эластомерных композитов. При построении информационной модели реограмму состояния рассматривают как инструмент управления технологическим процессом структурирования эластомерных композитов.

На основе декомпозиции функционально-технологической модели построен ряд диаграмм, в том числе для оценки качества резиновой смеси и контроля готового изделия и выявления брака, что позволило формализовать управление процессом на основе регламентирующих документов, представленных картой смеси и паспортом смеси.

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.

Приведена функциональная диаграмма процедуры принятия решений на производстве изделий из эластомерных композитов.

Функционально-технологическая модель производства изделий из эластомеров описывает последовательное преобразование ресурсов в готовую продукцию усилиями различных исполнителей на основе различных регламентирующих документов.

На начальном этапе производство изделий из эластомеров рассматривается как единый, целостный процесс, материалы, продукция, регламентирующие документы и исполнители не уточняются. Данный этап описывается диаграммой уровня А-0 (рис. 4). 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».



Рис. 4. Общая схема производства эластомерного композиционного материала (резины).

В дальнейшем на первом этапе декомпозиции выделено 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. (рис. 5.)

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 дальнейшей декомпозиции и разделен на 4 процесса: проверка смеси на пластичность, оценка вулканизационных свойств резиновой смеси, проверка однородности смешения и, собственно, технологический процесс вулканизации для получения готового изделия (рис. 6).

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 реометра Монсанто.

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

$$t_{c(90)} - t_{c(10)} = d \cdot \ln \left( \frac{10^{1/e} - 1}{10^{1/e} - 9^{1/e}} \right) + \frac{d}{e} \cdot \ln 9. \quad (5)$$

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

Полученные 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.

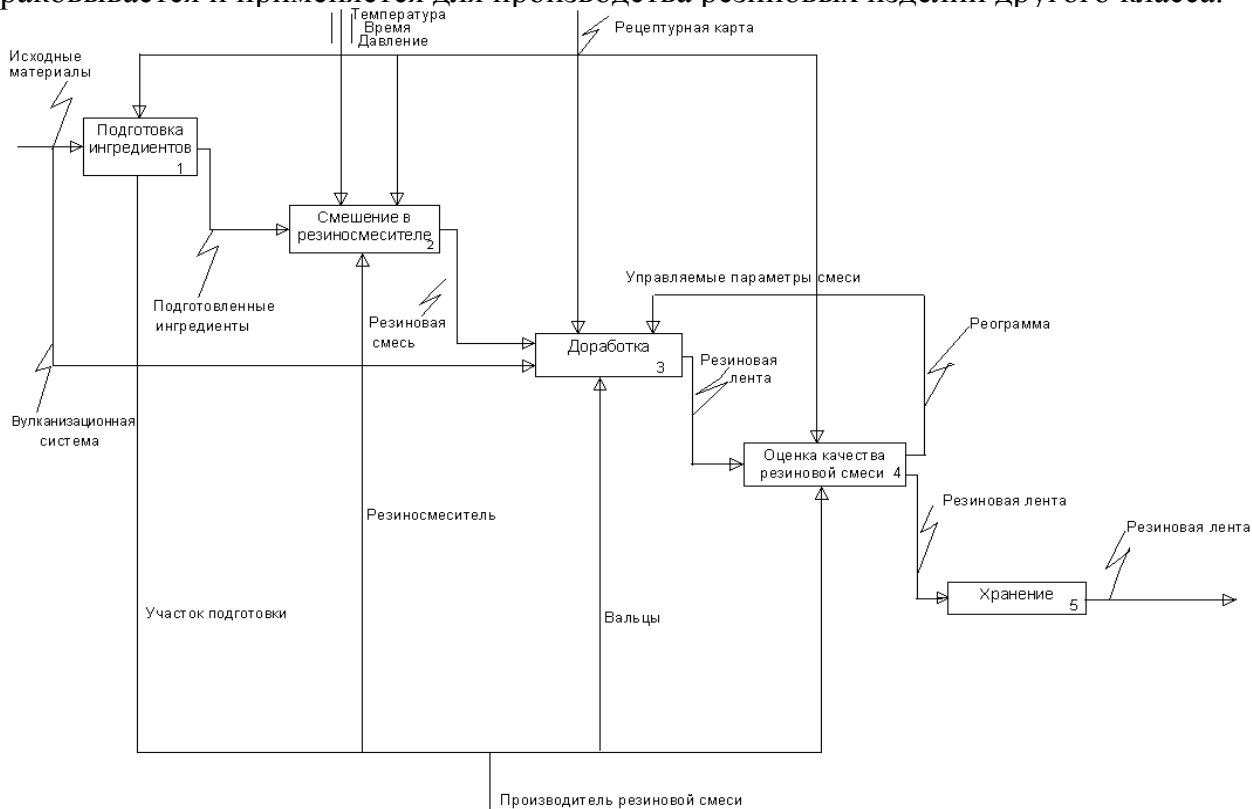


Рис. 5. Диаграмма А-1. Производство резиновой смеси

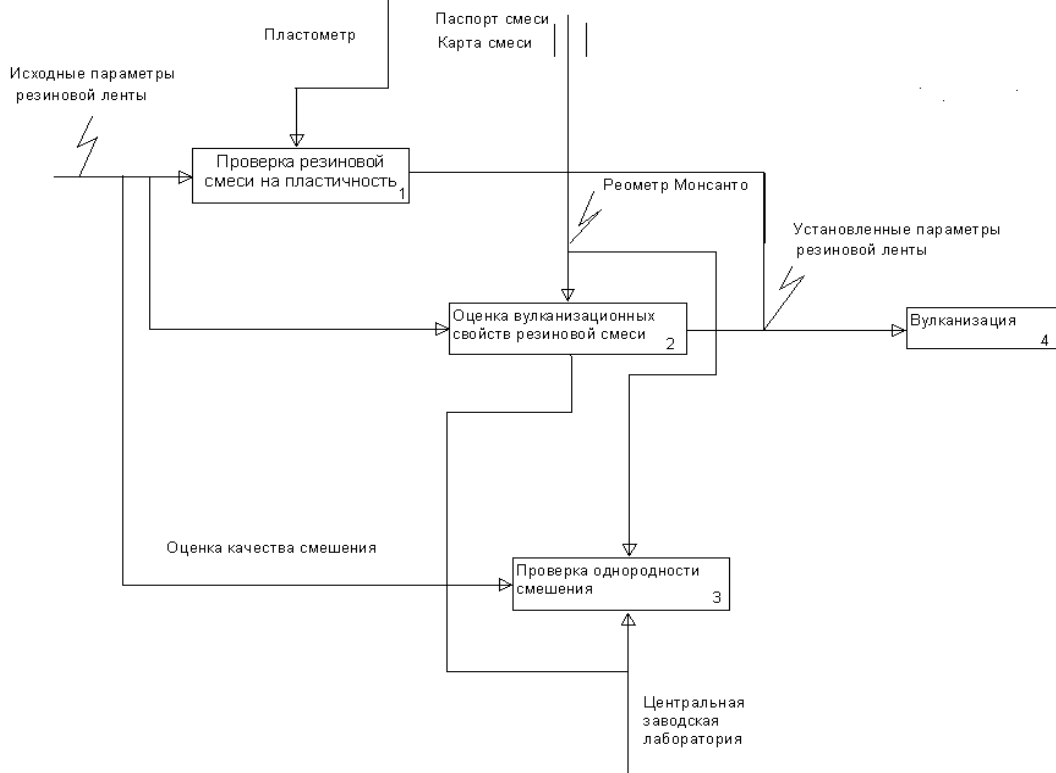


Рис. 6. Диаграмма А14. Оценка качества резиновой смеси.

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 A144 (рис. 7) и включает в себя процессы контроля свойств резиновой смеси, ее доработку (при необходимости), собственно процесс вулканизации, охлаждение продукта и контроль свойств готового изделия.

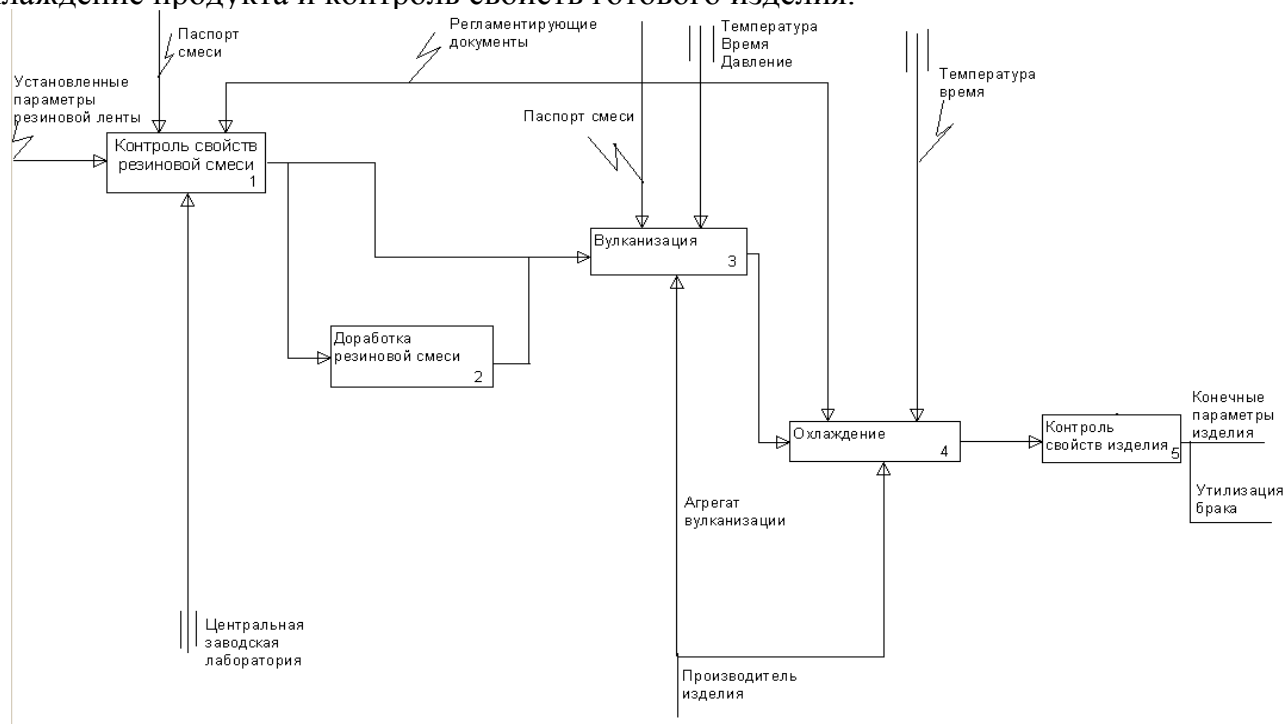


Рис. 7. Диаграмма A144. Вулканизация резиновой смеси (получение ЭКМ).

С помощью дуг «управление» описаны основные параметры, влияющие на протекание технологического процесса: температура, время 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, твердости, эластичности по упругому отскоку, истираемости. (рис. 8.) При соблюдении норм контроля мы получаем изделие с заданным комплексом свойств, при значительном отклонении – брак.

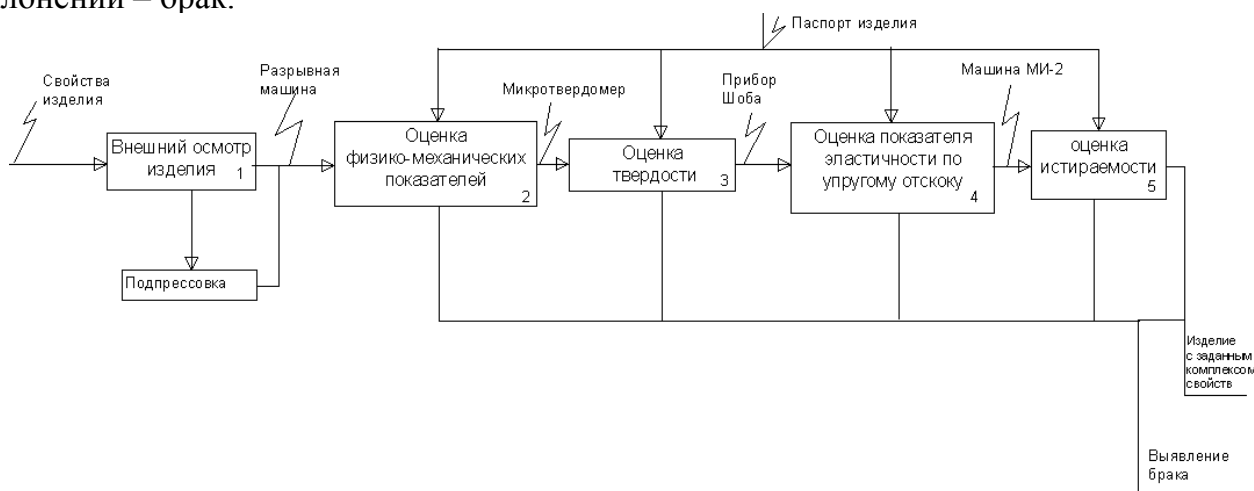


Рис. 8. Диаграмма A1445. Контроль готового изделия и выявление брака.

В третьей главе приведено описание реализации интеллектуальной системы управления технологическими процессами структурирования эластомерных композитов на основе экспертных систем принятия решений. Проведен обзор литературных источников

по экспертным системам управления на основе продукционных и когнитивных моделей. Приведена архитектура продукционной системы управления. Представлены основные типы автоматических регуляторов, применяемых в управлении процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов.

Предложено построение схемы автоматического управления технологическим процессом структурирования эластомерных композитов на основе продукционной модели управления. (рис. 9). Приведено описание основного современного прибора аналитического типа – прибора анализатора перерабатываемости резин RPA-2000, используемого в управлении процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов (рис. 10). Показано, что данный прибор является неотъемлемой частью интеллектуальной системы управления сложными химико-технологическими процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов.

Показана необходимость создания информационной базы данных как части экспертной системы управления.

На основе разработанных информационных моделей по описанию процессов структурирования эластомерных композитов была разработана объединенная база данных для централизованного хранения реографических данных. Для создания информационной базы данных реометрической информации было использовано более двухсот реограмм состояний многокомпонентных эластомерных композитов.

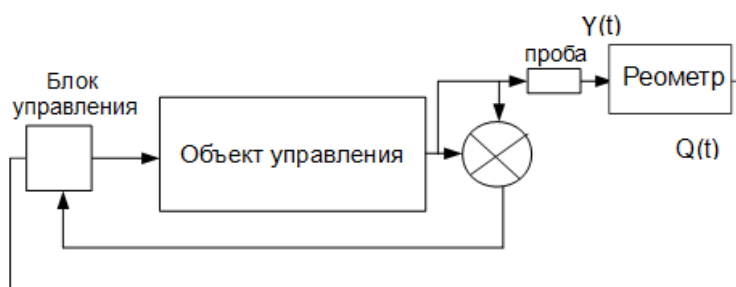


Рис. 9. Схема управления процессами структурирования эластомерных композитов.



Рис. 10. Прибор Анализатор перерабатываемости резин RPA-2000 фирмы Alpha Technologies.

Для построения базы данных реограмм состояния были построены концептуальная и реляционная модели данных. При проектировании структуры базы данных была построена реляционная модель данных в нотации IDEF1X (рис. 11).

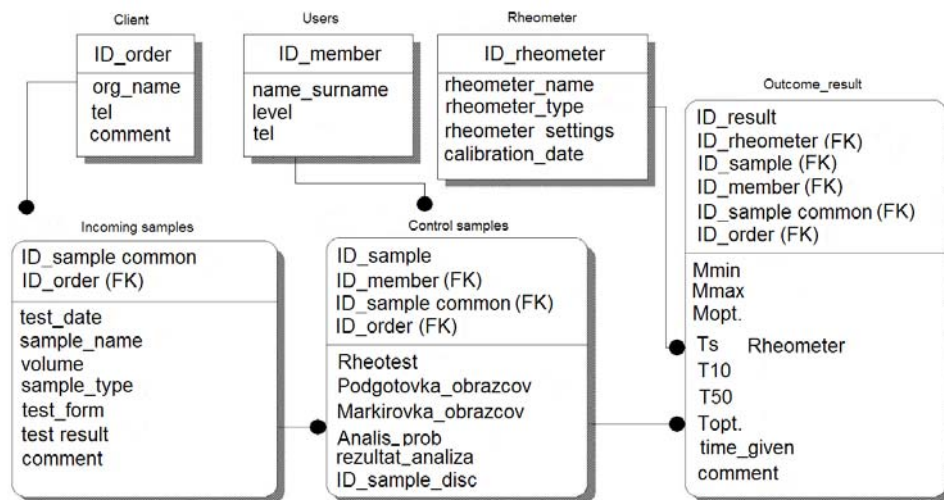


Рис. 11. IDEF1X (ER) модель ИБД реографической информации.

Модель включает в себя схему Основной базы 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.

Проведен сравнительный анализ продукционной и когнитивной моделей управления процессами структурирования эластомерных композитов. Разработана система продукционных правила для системы управления технологическим процессом структурирования эластомерных композитов (база знаний). Построено дерево решений по управлению процессами структурирования эластомерных композитов на основе анализа отклонения основных рецептурно-технологических факторов процесса от нормальных значений.

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 рис. 12)

Система содержит ряд подсистем, в число которых, кроме подсистемы поддержки управленческих решений, входят подсистемы работы с документами.

Так, подсистема нормативной документации, содержит информацию о нормативных характеристиках эластомерных композитов и показателях химико-технологических процессов их переработки.

Подсистема документов для лиц, принимающих решения (ЛПР) содержит формы основных отчетных документов по испытаниям эластомерных композитов и перечень получателей данной информации.

Подсистема поддержки принятия управленческих решений содержит блок визуализации реограмм состояния, базу данных реограмм, блок математических моделей и блок подготовки управленческих решений на основе производственных моделей.

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 производственных правил) и базы данных реограмм состояния (структура основных таблиц БД представлена на рис. 10).

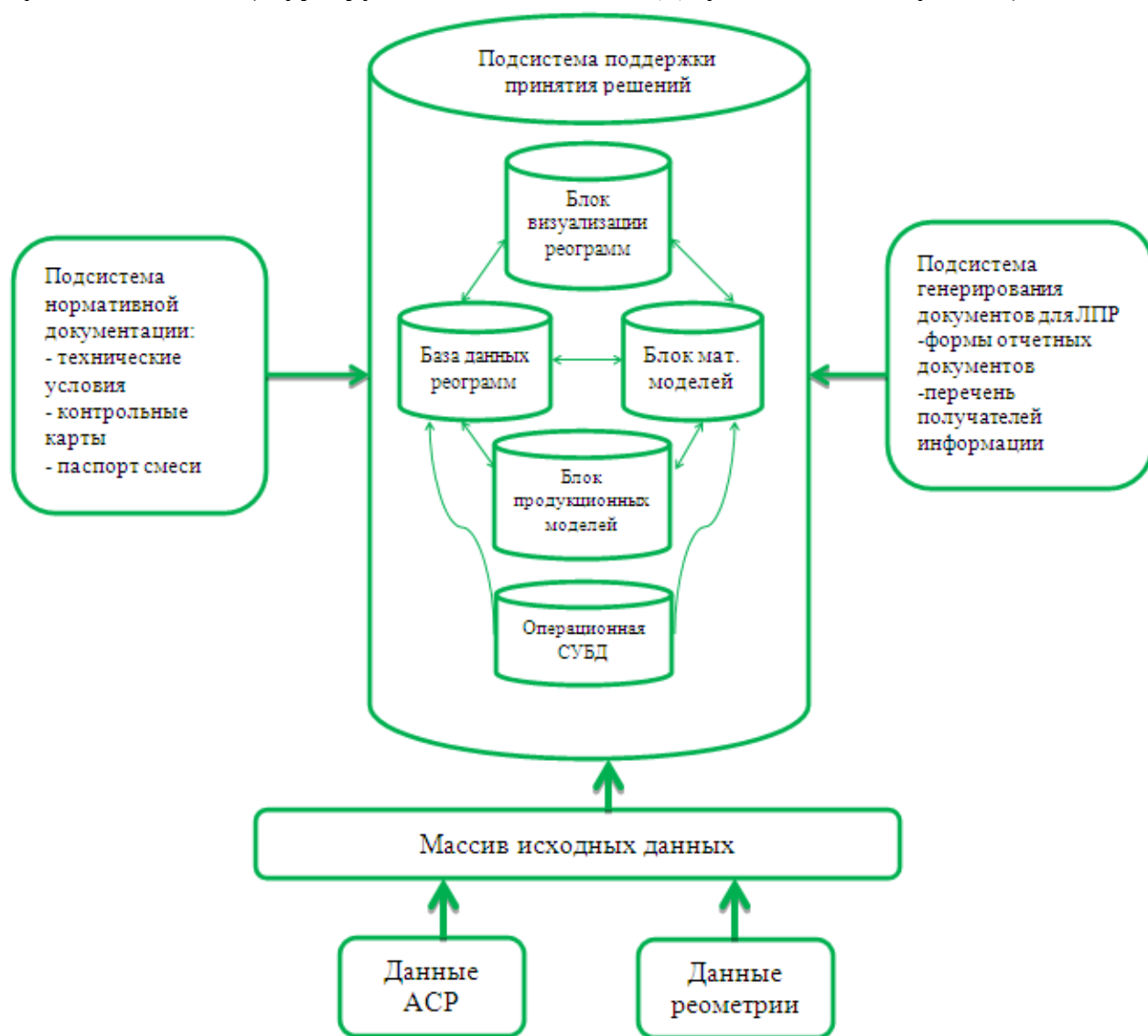


Рис. 12. Архитектура интегрированной информационной системы управления химико-технологическими процессами смешения и структурирования эластомерных композитов.

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

Подробно рассмотрен блок визуализации реограмм состояния. Приведено описание современных программных продуктов (Table curve 2d, Table curve 3d, Matlab 7), применяемых для построения графических изображений реограмм состояния и дериватограмм скорости и ускорения процесса. Приведен листинг для программного модуля по построению изолиний крутящего момента (Приложение 5).

Предложен алгоритма автоматизированной обработки реометрических данных (блок-схема приведена на рис. 13.)

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 2.2 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.

Предложенная интегрированная информационная система управления химико-технологическими процессами смешения и структурирования эластомерных композитов (рис. 12) может быть использована в качестве интеллектуального модуля подготовки принятия решений в системах АСУТП структурирования многокомпонентных эластомерных композитов, а также как модуль в обучающих программах и тренажерах в институтах и факультетах повышения квалификации технологов производств продукции из эластомерных материалов.

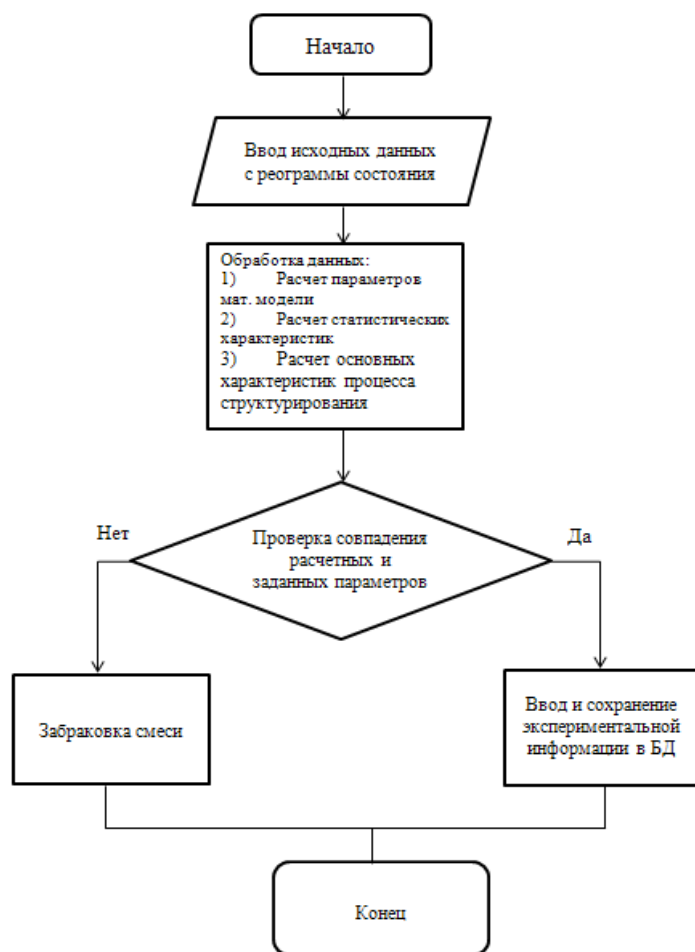


Рис. 13. Блок-схема алгоритма обработки основной реометрической информации процесса структурирования эластомерных композитов.

**В четвертой главе** рассмотрен ряд задач по системному анализу эффективности химико-технологических процессов структурирования эластомерных композитов с



применением интеллектуальной автоматизированной системы управления. В главе проведен анализ результатов математической обработки реограмм состояния.

На основе анализа реограмм состояния было предложено помимо использования безразмерной степени вулканизации  $\beta$  проводить модификацию координатных осей.

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. Были приведены приемы визуализации реограмм состояния в обобщенных координатах.

Чтобы получить обобщенные графические решения, вместо параметра времени введены обобщенные нормированные безразмерные характеристики следующего вида:  $(t-c)/d$ . (Рис. 14)

Был проведен анализ адекватности математических моделей при обработке реограмм состояния эластомерных композитов.

Получены основные соотношения между параметрами используемых математических моделей и количественными характеристиками сложных химико-технологических процессов структурирования многокомпонентных эластомерных композитов. Выполнено построение графических зависимостей основных количественных характеристик процесса структурирования эластомерных композитов от уровней рецептурно-технологических факторов.

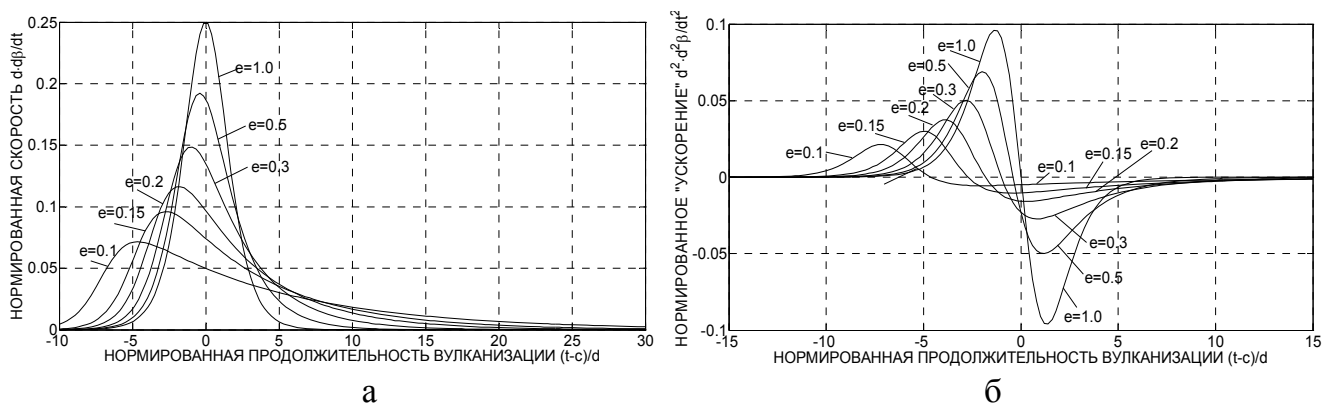


Рис. 14. Обобщенные графические решения для скорости (а) и ускорения (б) процесса структурирования эластомерных композитов.

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 **Заключении** подводятся итоги проведенного исследования, формулируются следующие **выводы**:

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Проведен системный анализ производства продукции из многокомпонентных эластомерных композитов, что позволило выявить стадии, на которых возможно наиболее эффективно организовать управление (смещение и структурирование эластомерных композитов) для повышения качества продукции и общей эффективности производства;
2. Построены математические и информационные модели описания и анализа химико-технологических процессов структурирования эластомерных композитов, что позволило увеличить число точек управления и использовать ряд новых критериев, количественно характеризующих процесс, для организации более тонкого и эффективного управления процессом структурирования эластомерных композитов;
3. Разработана архитектура интеллектуальной системы управления химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов, что позволяет организовать управление процессом на основе базы данных реограмм состояния, базы

производственных правил, блока визуализации и математического описания реограмм состояния;

4. Приведены примеры визуализации реограмм состояния с использованием современных программных продуктов, что позволяет оперативно анализировать реометрическую информацию и принимать решения по контролю и управлению процессом;

5. Показано применение разработанного в работе алгоритмическо-информационного обеспечения по системному анализу и управлению химико-технологическими процессами структурирования эластомерных композитов для подробного анализа результатов математической обработки реограмм состояния, что позволило применять его для обработки экспериментальных реограмм состояния, предоставленных слушателями промышленных предприятий, проходивших повышение квалификации в Государственном институте повышения квалификации и профессиональной переподготовке специалистов химической, микробиологической и медицинской промышленности МИТХТ им. М.В. Ломоносова.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи в журналах из перечня ВАК:*

1. 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.
2. 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
3. Кузнецов А.С. Анализ корреляционных соотношений в области реометрических исследований резин / И.М. Агаянц, Ю.А. Наумова, А.С. Кузнецов // Вестник МИТХТ. – 2013. – № 1 – с. 14–18.
4. 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.
5. 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.
6. Кузнецов А.С. Процессы смещения 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.
7. 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.

*Материалы научных конференций и тезисы докладов:*

8. Кузнецов А.С. Реограмма как инструмент управления технологическим процессом структурирования эластомерных систем / Кузнецов А.С., Агаянц И.М., Корнюшко В.Ф. // Научные химические технологии - 2015 : сб. тр. науч.-практ. конф. – М. : Изд-во МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 2015. – с. 143.
9. Кузнецов А.С. О применении системного подхода при анализе процессов структурирования эластомерных систем // Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности: сб. тр. между. науч.-практ. конф. – Смоленск, 2015. – С. 102-104.
10. 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.

11. 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.
12. 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.
13. 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
14. 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
15. 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.

\* \* \*

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить свою глубокую благодарность научному руководителю – заслуженному деятелю науки и техники, профессору, д.т.н. Корнюшко Валерию Федоровичу за внимание и ценные научно-методические консультации.

Автор выражает глубокую благодарность своему учителю – профессору, д.т.н. Агаянцу Ивану Михайловичу.