

## ОТЗЫВ

официального оппонента Семенова Анатолия Дмитриевича,  
доктора технических наук, профессора кафедры  
«Информационно-измерительная техника и метрология»  
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»  
на диссертационную работу Карманова Андрея Викторовича на тему:  
«Оптимальное управление процессом получения бутилрегенерата на основе  
методов нечеткой оптимизации», представленную на соискание ученой  
степени кандидата технических наук по специальности: 2.3.3 – Автоматизация  
и управление технологическими процессами и производствами

**Актуальность работы.** Научная работа связана с актуальной проблемой создания альтернативной технологии переработки отходов полимерных изделий на основе бутилкаучука в совокупности с исследованиями в области радиационной и термомеханической деструкции, а также проблемой недостаточности научных исследований в области управления технологическим процессом радиационной и термомеханической деструкции.

Обработка полимерных материалов ионизирующими излучениями, сопровождающаяся деструкцией полимерных цепей, является одним из наиболее перспективных способов переработки полимерных отходов, в том числе, отработанных резин на основе бутилкаучука. Кроме того, открывается возможность для создания изделий с заданными характеристиками, полученными в ходе обработки материалов при определенных условиях.

Значительный потенциал для развития процессов химической технологии обеспечивается использованием подходов, сочетающих в себе различные способы воздействия на материал с целью получения регенератов, таких как, радиационная и термомеханическая обработка. Комбинирование внешних воздействий в процессах получения регенерата на основе бутилкаучука обеспечивает возможность проведения контролируемой деструкции материала с минимальными энергозатратами на каждой стадии обработки.

Для исследования процесса деструкции целесообразно применение методов математического моделирования для описания его отдельных стадий с целью описания зависимостей изменения свойств получаемого материала от обработки. Решение задачи управления процессом получения бутилрегенерата позволит определять оптимальную комбинацию управляющих воздействий и параметров процесса для получения материалов с требуемым набором свойств.

Таким образом, исследования, направленные на развитие технологий переработки полимерных материалов и получения бутилрегенерата, которые

позволяют перерабатывать значительные объемы отходов шинной и резинотехнической промышленности, получать новые материалы с требуемым набором свойств на основе рекомендаций, получаемых благодаря реализуемому оптимальному управлению процессом, являются актуальными.

**Анализ содержания работы и ее завершенности.** Диссертационная работа изложена на 166 страницах машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы (214 наименований) и раздела приложения (включает 4 приложения). Текст диссертации содержит 26 рисунков и 24 таблицы.

Работа построена логично и оформлена в соответствии с требованиями нормативных документов.

Во **введении** приводятся данные об актуальности диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, отражены научная новизна, практическая значимость, а также сведения об апробации работы на различных научных конференциях, в публикациях по теме диссертации.

В литературном обзоре (**глава первая**) проведена оценка современного состояния научных исследований в области системного анализа и управления процессами деструкции. Автором рассмотрены различные методы регенерации полимеров, дана оценка их преимуществ и недостатков. Проведен анализ влияния различных факторов на изменение структуры полимеров и рассмотрены методы определения характеристик резиновых изделий, подвергшихся деструкции. Рассмотрены основные методы моделирования процессов деструкции, а также методы оптимизации исследуемых технологических процессов.

Во **второй главе** на основании современных теоретических подходов проведен анализ процесса деструкции полимерных материалов, вызванного радиационно-химическими и термомеханическими воздействиями. Проведен системный анализ технологического процесса как объекта управления и предложен способ управления его стадиями, при котором используется комбинация управляющих воздействий, что позволяет одновременно увеличить степень деструкции полимерной композиции.

Предложен способ управления технологическим процессом деструкции и получения бутилового регенерата с использованием метода программного управления. Реализация способа управления осуществлена на основе системы поддержки принятия решений (СППР). Сформирована структура автоматизированной системы оптимального программного управления

процессом деструкции с выделением основных составляющих математического и алгоритмического обеспечения СППР.

Рассмотрены теоретические основы математического моделирования процессов деструкции с учетом функциональных зависимостей, отражающих изменение вязкоупругих свойств материала в процессе деструкции основных и поперечных связей полимерной матрицы.

**Третья глава** посвящена математическому моделированию процессов радиационной и термомеханической деструкции, в ходе которого:

- разработана модель процесса деструкции, описывающая изменения моментов молекулярно-массового распределения основных цепей полимерной матрицы как функции степени деструкции;

- получены зависимости, связывающие показатели качества (вязкость по Муни, условная прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве) со значениями средней молекулярной массы основных цепей и концентрацией поперечных связей полимерной композиции;

- получены аналитические зависимости, связывающие вязкость по Муни бутилового регенерата с технологическими параметрами процесса: поглощенной дозой, температурой и временем механообработки;

- с использованием генетического алгоритма осуществлена параметрическая идентификация моделей отдельных стадий процесса получения бутилового регенерата и подтверждена их адекватность.

**В четвертой главе** осуществлен синтез алгоритмического обеспечения СППР процесса деструкции полимера и получения бутилового регенерата с заданными показателями качества. Установлено, что для получения заданных значений показателей качества и характеристик пространственной структуры полимерной матрицы необходима выработка обобщенного критерия оптимизации, объединяющего частные критерии и учитывающего их влияние на всех стадиях производственного цикла. Оценка значений коэффициентов важности частных показателей обобщенного критерия оптимизации осуществлена с использованием метода парных сравнений при последующем усреднении оценок экспертов. В результате разработан алгоритм системы поддержки принятия решений, позволяющий оценивать оптимальные параметры процесса с использованием нечеткого интеграла Шоке и нечеткой меры Сугено.

**В пятой главе** разработан алгоритм управления процессом, который включает в себя последовательность технологических, вычислительных и логических операций и позволяет осуществлять программное управление

режимными параметрами технологического процесса для получения бутилрегенерата с заданными показателями качества. Разработаны функциональная схема и сформирована алгоритмическая структура автоматизированной системы, позволяющая осуществлять оптимальное программное управление технологическим процессом. С использованием интегрированной среды Matlab/Simulink разработано программное обеспечение для эмуляции контура управления температурным режимом обработки резин на основе бутилкаучука в резиносмесителе.

**Научная новизна диссертационной работы** заключается в разработке алгоритма управления процессом деструкции полимерных материалов, характеризующегося агрегированием обобщенного критерия поиска оптимальных параметров с использованием нечеткого интеграла Шоке и нечеткой меры Сугено и позволяющего обеспечить требуемые свойства регенерата. При этом в основу математического обеспечения положены результаты моделирования радиационной и термомеханической деструкции полимерной матрицы, описывающие деструкцию как основных полимерных цепей, так и поперечных связей полимерной матрицы.

**Достоверность и обоснованность результатов исследований и выводов** исследований подтверждается полученными оценками точности разработанных моделей, базирующихся на экспериментальных данных с погрешностью до 10%. Полученные результаты согласуются с теоретическими положениями, опубликованными в литературе по теме исследования, а также строгими математическими обоснованиями.

**Практическая значимость диссертационной работы** заключается в том, что предложенная система принятия решений позволяет определять оптимальные управляющие параметры и выдавать рекомендации по управлению процессом для получения бутилрегенерата с заданными свойствами. Полученные результаты позволяют выбирать эффективные технологические режимы обработки материалов на основе бутилкаучука, что обеспечивает значительный экономический эффект на производственном этапе. В подтверждение этому представлены акты промышленной апробации от ООО «РПИ КурскПром» (г.Курск) и ООО «Совтех» (г. Воронеж), а также акт о передаче научно-технической информации от АО «Интех» (г. Москва).

**Полнота изложения материалов диссертации.** Результаты проведенных исследований опубликованы в 35 печатных работах, в том числе 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 5 статей в журналах, индексируемых

библиографическими и реферативной базой данных Scopus, 24 публикации в других изданиях. Автореферат диссертации и публикации А.В. Карманова отражают содержание диссертационной работы.

По диссертации и автореферату имеется ряд вопросов и замечаний:

1. Разработанная система управления процессом применима только для получения бутилрегенерата (переработки отходов резин на основе бутилкаучука) и производства материалов на основе бутилрегенерата или подходит и для других полимеров?

2. Не представлены характеристики разработанного программного обеспечения и практические рекомендации по использованию системы управления технологическим процессом получения бутилрегенерата.

3. Не указаны критерии выбора метода оптимизации параметров технологического процесса.

4. Отсутствует обоснование применения системы поддержки принятия решения в реальных производственных условиях.

5. В отдельных разделах используются разные термины (каучук, полимерный материал, резина на основе бутилкаучука) для обозначения одного и того же сырьевого продукта.

6. Почему в качестве частных критериев оптимизации (п. 1.5) не рассматривались такие критерии как экономический показатель или показатель технической целесообразности?

7. В главе 3 (п. 3.1.2 и 3.2.2) не приведены значения средней относительной погрешности вычислений показателей свойств регенератов – условной прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве – для оценки точности модели.

Сделанные замечания не снижают научную ценность работы, достоверность основных результатов и выводов диссертационной работы.

Диссертационная работа Карманова Андрея Викторовича на тему «Оптимальное управление процессом получения бутилрегенерата на основе методов нечеткой оптимизации», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук соответствует пунктам 2, 3, 4, 15 направлений исследований паспорта специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Карманова А.В. на тему: «Оптимальное управление процессом получения бутилрегенерата на основе методов нечеткой оптимизации», в которой решена

важная научно-практическая задача многокритериальной оптимизации технологических параметров процесса получения бутилрегенерата с учетом связи частных критериев стадий радиационной и термомеханической обработки с обобщённым критерием качества по своей актуальности, научной новизне и практической значимости полностью отвечает требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор – Карманов Андрей Викторович, заслуживает присвоения степени кандидата технических наук по специальности: 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Официальный оппонент

профессор кафедры «Информационно-измерительная техника и метрология» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», доктор технических наук, доцент

Семенов Анатолий Дмитриевич

« 5 » ноября 2022 г.

Научные специальности оппонента: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

Адрес: 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, д. 40  
Телефон: +7 (8412) 66-65-96; e-mail: [iit@pnzgu.ru](mailto:iit@pnzgu.ru)

Подпись Семенова А. Д.  Ученый секретарь  
ученого совета ПГУ, к.т.н., доцент



Дорофеева Ольга Станиславовна