

УДК 62.012:66.095.26  
ББК 3 965-015  
У47

Научный редактор профессор В.Г. МАТВЕЙКИН

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра программирования и информационных технологий  
Воронежского государственного университета;

С.Л. ПОДВАЛЬНЫЙ, д.т.н., проф.  
Воронежского государственного технического университета

Печатается по решению  
редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного университета инженерных технологий

У47 **Ультразвуковой контроль качества** эластомеров в условиях  
производства: монография/ В.К. Битюков, С.Г. Тихомиров,  
В.Ф. Лебедев [и др.]; Воронеж. гос. ун-т инж. технол. – Воронеж:  
ВГУИТ, 2011. – 292 с.  
ISBN 978-5-89448-881-3

Монография посвящена вопросам разработки ультразвуковых систем кон-  
троля качества эластомеров в условиях производства синтетических каучуков,  
резинотехнических изделий, а также их интеграции в контур систем управления  
промышленными процессами полимеризации и переработки эластомеров.

Монография предназначена для инженерно-технических работников хими-  
ческих производств и студентов, обучающихся по направлениям 220700.62 -  
«Автоматизация технологических процессов и производств» и 220400.62 -  
«Управление в технических системах».

у - 2804070000-51  
ОК2(03) – 2011

Без объявл.

УДК 62.012:66.095.26  
ББК 3 965-015

ISBN 978-5-89448-881-3

© Битюков В.К., Лебедев В.Ф.,  
Тихомиров С.Г., Хвостов А.А.,  
Хаустов И.А., 2011

© ФГБОУ ВПО «Воронеж. гос. ун-т инж.  
технол.», 2011

Оригинал-макет данного издания является собственностью Воронежского го-  
сударственного университета инженерных технологий, его репродуцирование (вос-  
произведение) любым способом без согласия университета запрещается.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	9
<b>1. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭЛАСТОМЕРОВ НА ПРОИЗВОДСТВЕ .....</b>	<b>10</b>
1.1. Классификация показателей качества эластомеров и методов их оценки .....	10
1.1.1. Технические свойства эластомеров.....	10
1.1.2. Пластоэластические свойства.....	12
1.1.2.1. Вязкость по Муни.....	14
1.1.2.2. Твердость по Шору .....	15
1.1.3. Прочностные свойства.....	16
1.1.4. Степень кристалличности.....	17
1.1.5. Оценка молекулярных параметров растворов эластомеров	21
1.1.5.1. Лабораторные методы оценки молекулярных масс и ММР полимера.....	24
1.1.5.2. Методы косвенной оценки молекулярных масс полимеров в ходе технологического процесса полимеризации .....	28
1.1.5.3. Оценка ММР методами моделирования процесса полимеризации.....	30
1.1.6. Применение УЗ методов для контроля свойств эластомеров .....	32
1.2. Реологическая общность методов контроля показателей качества эластомеров.....	34
1.2.1. Общность методов контроля технических показателей качества эластомеров и их реологические свойства.....	34
1.2.2. Вязкоупругие и релаксационные свойства эластомеров ....	36
1.2.3. Принцип температурно-временной эквивалентности.....	39
1.2.4. Тангенс угла механических потерь $\text{tg}(\delta)$ .....	40
1.2.5. Спектр времен релаксации .....	45
1.3. Основные положения синтеза структуры УЗ информационно-измерительной системы контроля качества эластомеров .....	48
1.4. Основные задачи для разработки методологии синтеза информационно-измерительной УЗ системы контроля качества эластомеров .....	54

<b>2. СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УЗ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭЛАСТОМЕРОВ .....</b>	<b>57</b>
2.1. Организация структуры информационно-измерительной УЗ системы контроля качества эластомеров .....	57
2.2. Физические основы синтеза подсистем оценки свойств эластомеров для расчета показателей качества .....	62
2.2.1. Оперативный контроль акустических свойств эластомеров в рамках прикладной акустики .....	62
2.2.2. Оценка вязкоупругих свойств эластомеров акустическими методами в рамках теории линейной вязкоупругости.....	64
2.2.3. Физические основы математического моделирования свойств растворов эластомеров для ультразвуковых систем контроля качества.....	73
2.3. Математические модели показателей качества эластомеров как функции акустических свойств в косвенных системах контроля .....	76
2.4. Обработка информации об акустических свойствах эластомеров для расчета показателей качества .....	78
2.5. Задачи дальнейших исследований .....	85
<b>3. СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ФОРМАЛИЗУЮЩИХ СИСТЕМНУЮ СВЯЗЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АМОРФНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ .....</b>	<b>86</b>
3.1. Синтез математической модели измерения показателя качества полимера УЗ способом при фиксированной частоте и температуре (на примере измерения степени кристалличности каучука) .....	87
3.1.1. Теоретическое обоснование математической модели степени кристалличности полимера как функции акустических свойств .....	88
3.1.1.1. Применение принципа суперпозиции релаксационных процессов в частично закристаллизованном полимере .....	88
3.1.1.2. Структурная идентификация математической модели ультразвукового измерения степени кристалличности каучуков .....	91

3.1.2. Параметрическая идентификация и исследование математической модели степени кристалличности.....	95
3.1.2.1. Техника и методика экспериментальных исследований .	95
3.1.2.2. Обработка экспериментальных данных .....	99
3.1.2.3. Параметрическая идентификация модели.....	102
3.1.2.4. Исследование свойств разработанной математической модели .....	103
3.2. Синтез математической модели твердости полимера как функции акустических свойств.....	108
3.3. Структурный синтез математических моделей предельной прочности и вязкости по Муни полимера как функции акустических свойств .....	111
3.4. Оценка спектра показателей качества УЗ способом.....	118
3.5. Методика экспериментальных исследований математических моделей пластоэластических, прочностных и акустических свойств аморфных эластомеров .....	123
3.5.1. Экспериментальная проверка математических моделей показателей качества эластомеров .....	123
3.5.2. Обработка результатов и параметрическая идентификация.....	126
3.5.3. Оценка погрешностей реализуемых методов контроля....	133
<b>4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАСТВОРАХ ЭЛАСТОМЕРОВ ДЛЯ УЗ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА</b>	<b>136</b>
4.1. Использование математических моделей колебательного движения макромолекул эластомера в растворе для контроля качества .....	136
4.2. Структурно-параметрический синтез математических моделей показателей качества растворов эластомеров.....	137
4.2.1. Математическая модель вынужденного колебательного движения макромолекулы в вязкой среде при гармоническом импульсном возмущении .....	137

4.2.2. Связь параметров математической модели вынужденного колебательного движения макромолекулы в вязкой среде при импульсном возмущении с показателями качества растворов эластомеров .....	144
4.2.3. Исследование математической модели колебательного процесса и её упрощение для технических расчетов .....	147
4.2.4. Идентификация параметров уравнения колебательного движения макромолекулы как функции показателей качества и концентрации полимера в растворе.....	149
4.3. Синтез методики экспресс-оценки качества полимера в растворе .....	165
4.3.1. Независимое измерение молекулярных масс и концентрации полимера в растворе при известной температуре ..	165
4.3.2. Численный пример .....	167
4.4. Введение температурной поправки для вязкости при отсутствии термостатирования.....	169
<b>5. МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ ЭЛАСТОМЕРОВ ДЛЯ УЗ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭЛАСТОМЕРОВ .....</b>	<b>171</b>
5.1. Функциональная модель методики синтеза математических моделей для систем контроля качества .....	171
5.1.1. Оценка показателей качества эластомеров по распределениям измеряемых значений .....	171
5.1.2. Функциональная модель процесса обработки экспериментальных данных, описывающих распределение измеряемой величины .....	172
5.1.3. Классификация ситуаций .....	174
5.1.3.1. Выбор признаков классификации .....	176
5.1.3.2. Построение классификатора .....	177
5.1.3.3. Алгоритм классификации.....	179
5.1.4. Идентификация входных значений.....	182
5.1.4.1. Моделирование многомодальных распределений .....	183
5.1.4.2. Интерпретация параметров аппроксимирующей модели.....	188
5.1.5. Оценка показателей качества по параметрам распределений.....	190

5.2. Методика синтеза математических моделей для оценки качества эластомеров по параметрам распределений .....	191
5.3. Использование математических моделей распределений вязкоупругих свойств для контроля качества аморфных эластомеров (на примере температур релаксационных переходов и времен релаксации) .....	192
5.3.1. Определение показателя качества по температурным и частотным распределениям тангенса угла механических потерь .	192
5.3.2. Подходы к моделированию тангенса угла механических потерь .....	194
5.3.3. Применение семейств универсальных распределений Пирсона для моделирования зависимостей $\text{tg } \delta(\omega, T)$ .....	197
5.3.4. Синтез математической модели тангенса угла механических потерь для вязкоупругого тела с тремя релаксационными механизмами .....	203
5.3.5. Анализ математической модели тангенса угла механических потерь .....	206
5.3.6. Сравнительный анализ методов моделирования тангенса угла механических потерь .....	209
5.3.7. Методика моделирования тангенса угла механических потерь для оценки свойств модифицированных эластомеров .....	216
5.4. Математические модели распределений вязкоупругих свойств растворов эластомеров для систем контроля качества (на примере спектров времен релаксации и функций ММР) .....	220
5.4.1. Обоснование метода контроля ММР в ходе процесса полимеризации .....	220
5.4.2. Контроль спектра времен релаксации акустическими методами .....	224
5.4.3. Алгоритм определения спектра времен релаксации акустическим способом .....	228
5.4.4. Связь спектра времен релаксации с концентрацией полимера в растворе .....	230
5.4.5. Синтез математической модели спектра времен релаксации .....	231
5.4.6. Синтез модели ММР полимера как функции его акустических свойств .....	235

5.4.7. Оценка погрешностей и быстродействия методов контроля .....	238
<b>6. ПРИМЕНЕНИЕ УЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛАСТОМЕРОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕ .....</b>	<b>242</b>
6.1. Технические решения по реализации метода контроля степени кристалличности в шинном производстве .....	242
6.1.1. Процесс декристаллизации каучуков в подготовительных стадиях шинного производства .....	242
6.1.2. Определение времени декристаллизации брикета каучука	245
6.1.3. Методика определения времени декристаллизации брикета каучука .....	247
6.1.4. Применение математической модели ультразвукового измерения степени кристалличности каучуков в контуре системы управления процессом декристаллизации .....	249
6.2. Техническая реализация методов экспресс-оценки качества аморфных эластомеров при переработке эластомеров и их отходов .....	251
6.3. Техническая реализация методов контроля показателей качества растворов полимеров в условиях действующего производства синтетических каучуков .....	254
6.3.1. Общий алгоритм расчета физико-химических показателей по измеряемым параметрам и акустическим свойствам раствора полимера .....	254
6.3.2. Устройство для непрерывного контроля физико- химических параметров полимеров в растворах и его использование в контуре АСУТП полимеризации .....	255
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>260</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>262</b>