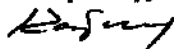


На правах рукописи



**КАПУСТИН АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ШИННЫХ РЕЗИН НА ПАРАМЕТРЫ  
ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ УПРУГИХ СВОЙСТВ И  
ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ПРАКТИКЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШИН**

05.17.06 – "Технология и переработка полимеров и композитов"

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Ярославль – 2004



Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ярославский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
Соловьев Михаил Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Петерсон Станислав Антонович

кандидат технических наук  
Котусенко Борис Владимирович

Ведущая организация: ФГУП «НИИШП», г. Москва

Защита диссертации состоится « 16 » марта 2004 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета КМ 212.308.01 в Ярославском государственном техническом университете по адресу:  
150023, г. Ярославль, Московский проспект, 88, ауд. Г-219.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ярославского государственного технического университета.

Автореферат разослан « 13 » февраля 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

  
Панкратов В.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

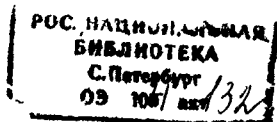
**Актуальность работы.** Необходимость более строгого подхода к описанию нелинейных свойств материалов, используемых в шинах и РТИ, чем это было принято ранее, обусловлена двумя причинами. Первая связана с расчетами равновесной конфигурации и жесткостных характеристик изделия в целом, вторая – с определением истинных напряжений и деформаций, а также теплообразования в изделиях для прогноза их работоспособности в условиях реальной эксплуатации. В ближайшем будущем наиболее актуальной задачей станет усовершенствование расчетных методов (многослойные оболочки, МКЭ) с целью использования нелинейных термовязкоупругих характеристик резины и корда.

Хотя далеко не все проблемы, связанные с выбором способа учета нелинейных свойств резины на сегодняшний день решены, практика проведения конструкторских расчетов резиновых изделий, основанных на применении современных численных методов механики сплошных сред постоянно расширяется. В процессе проведения таких расчетов решаются задачи не только оптимизации геометрии изделия, но и рационального выбора упругих и прочностных свойств составляющих его материалов. Последняя задача не может быть до конца решена при отсутствии математических моделей, связывающих параметры упругих и вязкоупругих свойств резины с ее составом. Качественные представления о влиянии типа каучука и базовых ингредиентов резиновых смесей: содержания и типа вулканизирующих агентов, содержания и типа наполнителей, содержания пластификаторов и мягчителей на структуру и упруго-деформационные свойства резин в настоящее время являются достаточно устоявшимися. Однако количественное описание этих зависимостей с детализацией, достаточной для практического расчета параметров упругих свойств пока отсутствует.

**Цель и задачи работы.** Целью диссертационной работы явилось построение количественных зависимостей между составом и параметрами упругих и вязкоупругих свойств шинных резин для использования их при расчете напряженно-деформированного состояния шин.

В процессе работы были решены следующие задачи:

- ♦ На основании феноменологической модели вязкоупругих свойств резин при одноосном растяжении разработана методика определения параметров вязкоупругих свойств резин;
- ♦ Исследовано влияние соотношения и типа основных ингредиентов резиновых смесей на вязкоупругие свойства шинных резин;
- ♦ Созданы математические модели "состав-свойство" для расчета параметров упругих и вязкоупругих свойств шинных резин;



- ◆ На основании обработки результатов испытаний опытных и серийных резин создана база данных параметров вязкоупругих свойств шинных резин ОАО ЯШЗ;
- ◆ Разработана методика корректировки состава шинных резин на основе анализа напряженно-деформированного состояния шины.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

Установлены количественные соотношения между содержанием, а также типом базовых ингредиентов шинных резиновых смесей и параметрами упругих и вязкоупругих свойств резин на их основе.

Выявлен эффект анизотропии структурной пластичности резин, заключающийся в зависимости степени размягчения резин при повторных деформациях от направления действия нагрузки в предыдущем цикле растяжения, что позволило прояснить роль вулканизирующего агента и наполнителя в механизмах гистерезисных потерь в резинах при однократной и циклической деформации.

Обоснована возможность оптимизации состава резин деталей шины по результатам анализа ее напряженно-деформированного состояния при использовании в качестве критериев оптимальности функций главных напряжений и деформаций в контактирующих деталях.

**Практическая ценность** диссертационной работы состоит в том, что созданные в результате методики испытаний и расчетов, а также базы данных параметров упругих и вязкоупругих свойств резин, внедренные на ОАО "Ярославский шинный завод", позволяют использовать при проектировании шин в полной мере возможности универсальных конечно-элементных пакетов программных средств. Это в свою очередь позволяет добиться существенного сокращения времени и затрат на подготовку проектов, за счет проведения вариантных расчетов и решения задач оптимизации, повысить обоснованность вновь создаваемых конструкций шин. В результате было достигнуто существенное повышение ходимости вновь созданных моделей шин, исключено появление дефектов, причины которых до внедрения данной работы не были установлены.

**Автор защищает:**

1. Методики расчетной оценки вязкоупругих констант шинных резин;
2. Полученные в результате экспериментов количественные соотношения между содержанием, а также типом базовых ингредиентов шинных резиновых смесей и параметрами упругих и вязкоупругих свойств резин на их основе;
3. Математические модели для описания зависимостей параметров равновесных упругих и вязкоупругих свойств резин от типа и содержания базовых ингредиентов шинных резиновых смесей;
4. Методики корректировки состава деталей шин по результатам анализа напряженно-деформированного состояния шин.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований и отдельные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих симпозиумах и конференциях:

- Одиннадцатый международный симпозиум “Проблемы шин и резинокордных композитов”, Москва, НИИШП, 2000 г;
- Тринадцатый международный симпозиум “Проблемы шин и резинокордных композитов”, Москва, НИИШП, 2002 г;
- Четырнадцатый международный симпозиум “Проблемы шин и резинокордных композитов”, Москва, НИИШП, 2003 г;
- Международная научно-техническая конференция “Полимерные композиционные материалы и покрытия POLYMER 2002”, Ярославль, ЯГТУ, 2-5 декабря 2002г.
- 1-ая Всероссийская конференция по каучуку и резине. Москва, 26-28 февраля 2002 г.
- Первая научно-техническая конференция молодежных разработок, Ярославль, ЯШЗ, 11 октября 2002г.

**Публикации.** Основное содержание диссертации отражено в девяти печатных работах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и содержит 218 страниц машинописного текста, 50 рисунков, 38 таблиц, список использованной литературы из 177 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит обоснование актуальности темы, формулировку цели работы и ее краткую аннотацию.

**Первая глава** диссертации содержит обзор и анализ научной литературы по теме исследований, а именно - по деформационным свойствам эластомерных композиций на основе каучуков общего назначения и использованию параметров упругих свойств резин при анализе напряженно-деформированного состояния шин. Рассмотрены существующие феноменологические и молекулярные теории в случаях равновесного и неравновесного нагружения, а также примеры использования нелинейных механических свойств резин и резинокордных композитов при анализе напряженно-деформированного состояния шин и РТИ.

Представленный обзор освещает проблемы, связанные с выбором способа учета нелинейных свойств резины в практике проведения конструкторских расчетов резиновых изделий, основанных на применении современных численных методов механики сплошных сред. В процессе проведения таких расчетов решаются задачи не только оптимизации геометрии изделия, но и рационального выбора упругих и прочностных свойств составляющих его

материалов. Последняя задача не может быть до конца решена при отсутствии математических моделей, связывающих параметры упругих и вязкоупругих свойств резины с ее составом. На сегодняшний день имеются только качественные представления о влиянии типа и содержания каучуков и базовых ингредиентов на структуру и упруго-деформационные свойства резин. Отсутствует количественное описание этих зависимостей с детализацией, достаточной для практического расчета параметров упругих свойств.

На основании проведенного анализа научной литературы сформулированы цель и основные задачи настоящих исследований.

Во второй главе разработан метод экспериментального определения упругих свойств резин при испытании на одноосное растяжение, описаны стандартные методики испытания физико-механических свойств резин. Сущность метода экспериментального определения параметров упругих свойств резин при испытании на одноосное растяжение заключается в растяжении образцов с постоянной скоростью до разрыва при нескольких скоростях и последующей обработке результатов с целью оценки параметров упругих и вязкоупругих свойств резины. Приведены рецептуры модельных резиновых смесей, использованных в качестве объектов исследования для установления влияния рецептурных факторов на параметры упругих и вязкоупругих свойств.

В качестве исследованных базовых ингредиентов были использованы: каучуки общего назначения СКИ-3, СКМС-30АРКМ-15, СКД; природная и полимерная сера; технический углерод марок П-234 и П-514; масло ЯП-1.

Третья глава работы посвящена разработке методики оценки параметров упругих и вязкоупругих свойств по результатам испытаний резин на одноосное растяжение.

Предложенный подход позволяет, используя разложения в ряды неравновесной свободной энергии и скорости производства энтропии получать феноменологические уравнения нелинейной вязкоупругости для простых режимов нагружения, не прибегая при этом к механическим аналогиям. Вывод уравнений в данном случае основывается на неравновесной термодинамике, что позволяет ограничить диапазон всех мыслимых ядер релаксации интегральных уравнений вязкоупругости и механических моделей физически обоснованными рамками.

При отсутствии напряжения в недеформированном состоянии зависимость напряжения от деформации при постоянной скорости растяжения можно выразить уравнением:

$$\sigma(\lambda) = \sigma_e(\lambda) + \eta v \left( 1 - e^{-\frac{(\lambda-1)}{v\tau}} \right), \quad (1)$$

где  $\sigma_e(\lambda)$  - равновесное напряжение, МПа;  $\eta$  - вязкость,  $\text{МПа} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $v$  - скорость растяжения,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\lambda$  - деформация;  $\tau$  - время релаксации, с.

Равновесное напряжение в формуле (1) получено из разложения равновесной свободной энергии в ряд по инвариантам тензора деформации. При сохранении трех членов ряда с учетом условия несжимаемости имеет вид:

$$\sigma_e(\lambda) = C_1 \left( 2\lambda - \frac{2}{\lambda^2} \right) + C_2 \left( 2 - \frac{2}{\lambda^3} \right) + 2C_3 \left( \lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) \left( 2\lambda - \frac{2}{\lambda^2} \right) \quad (2)$$

Оценки коэффициентов нелинейных упругих свойств (констант  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ) и параметров вязкоупругости (времени релаксации  $\tau$  и вязкости  $\eta$ ) получаются путем обработки экспериментальных данных по одноосному растяжению резин при нескольких скоростях деформации методом наименьших квадратов с использованием процедуры оптимизации при нелинейном оценивании параметра  $\tau$ .

В результате обработки экспериментальных данных было выяснено, что при описании равновесных упругих свойств уравнением, содержащим три константы уравнения Муни-Ривлина -  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  для большинства наполненных резин значение константы  $C_2$  получается отрицательным, что противоречит физическому смыслу коэффициента упругости и приводит к расходимости численных алгоритмов при использовании такого потенциала в расчетах напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов. Из двухпараметрических уравнений уравнение, включающее только константы  $C_1$  и  $C_2$  для большинства резин оказывается неадекватным при больших деформациях. Уравнение, включающее две константы  $C_1$  и  $C_3$  оказалось адекватным для всех исследованных резин. Поэтому с учетом также того, как было показано в предшествующих работах, константа  $C_2$  имеет слабую корреляцию с составом резин, в дальнейшем анализе влияния состава на нелинейные упругие свойства резин при больших деформациях использовался вариант уравнения, включающий только две константы упругих свойств  $C_1$  и  $C_3$ :

$$\sigma(\lambda) = C_1 \left( 2\lambda - \frac{2}{\lambda^2} \right) + 2C_3 \left( \lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) \left( 2\lambda - \frac{2}{\lambda^2} \right) + \eta v \left( 1 - \exp \left( -\frac{\lambda-1}{v\tau} \right) \right) \quad (3)$$

Проведенное исследование по описанной выше феноменологической модели влияния состава резин на параметры их упругих и вязкоупругих свойств показало, что в целом при этом наблюдаются закономерности, согласующиеся с общепринятыми представлениями о влиянии состава на упругие и вязкоупругие свойства резин. Вместе с тем, удалось выявить также ряд новых эффектов, касающихся, прежде всего, изменения параметров упругих свойств в области больших деформаций (константа  $C_3$ ), а также получить количественные зависимости, необходимые для построения их математических моделей.

С увеличением дозировки серы, возрастает значение параметра  $C_1$ , как в случае полимерной, так и в случае природной серы (рис. 1). При равных дозировках, у смесей, содержащих природную серу, параметр  $C_1$  имеет значения выше, чем в случае полимерной серы. Значения параметра  $C_3$  возрастают с увеличением содержания серы в смеси (см. рис. 1). При малых дозировках серы, значения  $C_3$  у смесей с природной и полимерной серой значимо не различаются. Однако, с увеличением содержания серы, значения  $C_3$  у смесей с природной серой, принимают значения выше, чем при равных дозировках полимерной серы.

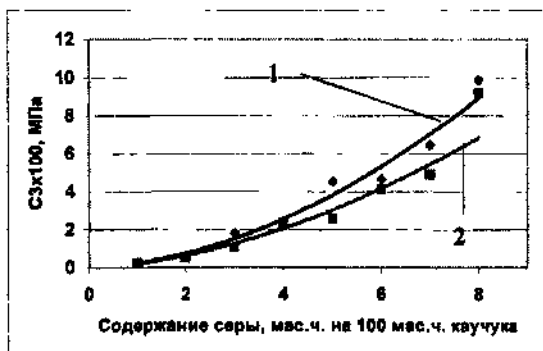
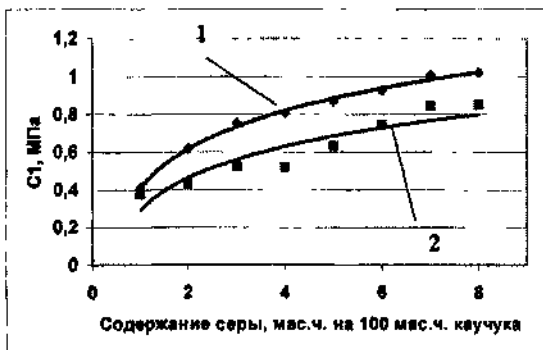


Рис. 1. Влияние типа и содержания серы на равновесные константы  $C_1$  и  $C_3$ : 1 - природная сера, 2 - полимерная сера.

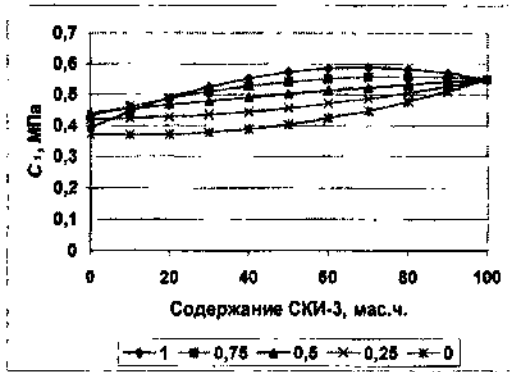
углерод при равных дозировках наполнителя значения константы  $C_3$  оказываются более высокими. С увеличением массовой доли технического углерода вязкость вулканизатов возрастает, а время релаксации изменяется не значимо.

В отличие от равновесных упругих свойств, оценки параметров неравновесных упругих свойств (вязкость и время релаксации) подвержены существенно большему статистическому разбросу. Статистический анализ показывает, что тип серы не влияет значимо на неравновесные параметры. При этом вязкость значимо не меняется также и с ростом дозировки серы в смеси. Время релаксации с увеличением дозировки серы уменьшается.

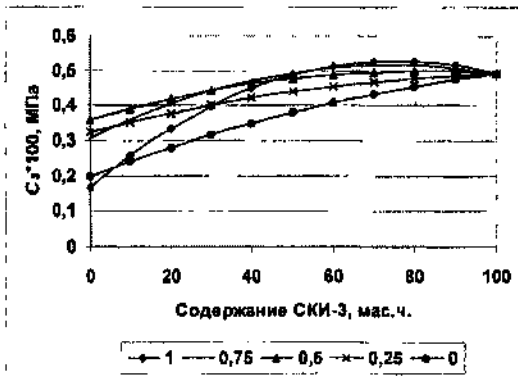
С увеличением содержания технического углерода П-234 и П-514, в смеси растут значения констант  $C_1$  и  $C_3$ , причем для резин, содержащих активный технический



С увеличением объемной доли масла ЯП-1 обе константы  $C_1$  и  $C_3$



монотонно уменьшаются, что согласуется с общепринятыми представлениями о влиянии мягчителя на коэффициенты упругости. Введение масла в большей степени сказывается на константе  $C_1$  резин, содержащих активный технический углерод П-234. С увеличением содержания масла вклад неравновесной составляющей напряжения снижается.



С увеличением содержания СКД-3 в смеси коэффициенты упругости  $C_1$  и  $C_3$  возрастают. Для константы  $C_3$  эти зависимости проходят выше аддитивных значений при всех соотношениях СКД/СКМС-30АРКМ15 (рис. 2). В случае константы  $C_1$  прирост равновесного модуля происходит выше аддитивного лишь при малом содержании бутадиен-стирольного каучука.

Рис. 2. Влияние типа и содержания каучуков на равновесные константы  $C_1$  и  $C_3$ . Цифрами на легенде указана массовая доля СКД в оставшейся части каучука (СКД+СКМС-30АРКМ15).

В смесях содержащих более 50 мас. частей СКД-3 замена части СКД на СКМС-30АРКМ15 приводит к заметному снижению равновесных коэффициентов упругости (см. рис. 2). В смесях СКД-3/СКД изменение времени релаксации и вязкости от содержания СКД-3 практически антисимметрично зависимостям  $C_1$  и  $C_3$  (рис. 3). Это с одной стороны соответствует общепринятым представлениям о полиизопрене, как каучуке, обладающим наиболее высокими эластическими свойствами, а с другой стороны согласуется с выводами молекулярной теории вязкоупругих свойств, в соответствии с которой, время релаксации редко сшитых эластомеров снижается с увеличением густоты

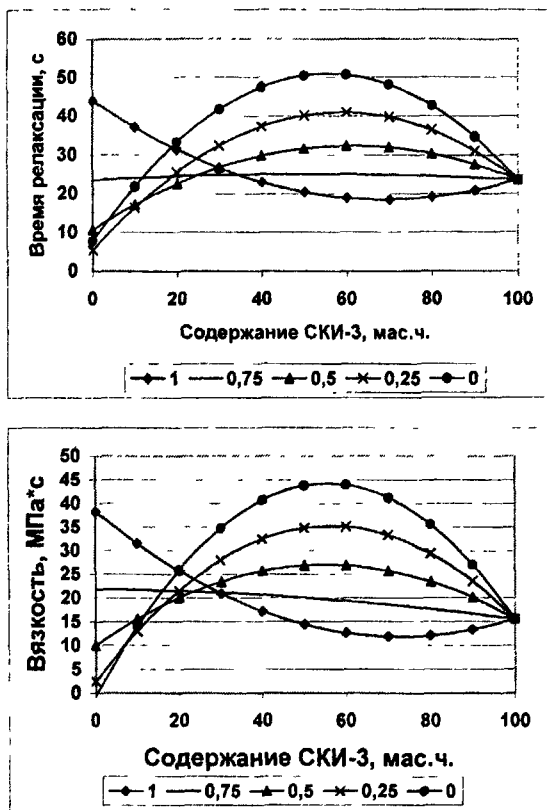


Рис. 3. Влияние типа и содержания каучуков время релаксации и вязкость опытных смесей. Цифрами на легенде указана массовая доля СКД в оставшейся части каучука (СКД+СКМС-30АРКМ15).

размягчение резины происходит только в направлении предыдущего цикла растяжения и не происходит в перпендикулярном направлении. Это позволяет уточнить представления о механизме размягчения резин при больших деформациях.

Рассмотренное в настоящей главе влияние состава на параметры упруго-гистерезисных свойств шинных резин позволило подойти к решению задачи количественного описания данных зависимостей в виде математических

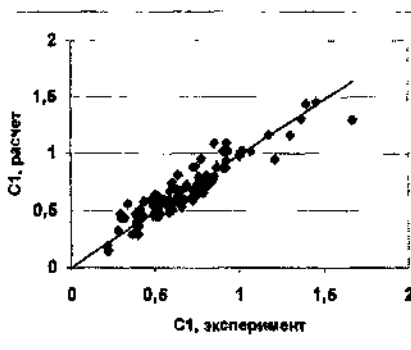
сетки. В тройных композициях картина усложняется. Так, замена СКД на композицию, содержащую 0,25 массовых долей бутадиен-стирольного каучука практически нивелирует влияние полиизопрена (см. рис. 3).

При изучении гистерезисных свойств резин в настоящей работе сделана попытка оценить влияние эффекта Патрикеева-Маллинса на анизотропию упругих свойств, поскольку этому его аспекту ранее не уделялось внимания. Полученные результаты, свидетельствуют о том, что эффект Патрикеева-Маллинса (структурной пластичности) обладает анизотропией, состоящей в том, что при повторных циклах нагружения,

моделей "состав - свойство", пригодных для практического использования в конструкторских расчетах.

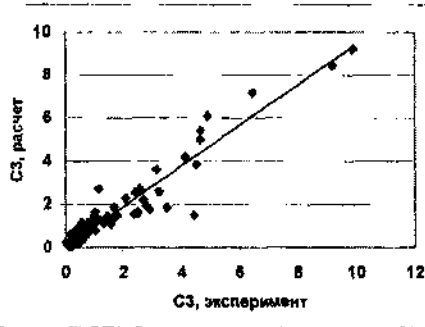
В четвертой главе диссертации описаны математические модели для расчета параметров равновесных упругих и вязкоупругих свойств резин на основании их состава. В качестве таких моделей использованы уравнения регрессии в виде произведения функций, зависящих соответственно от дозировки серы, технического углерода и мягчителя. Тип ингредиентов учитывался в уравнениях при выборе значений коэффициентов соответствующих функций.

В качестве формальных параметров функций были использованы



дозировки соответствующих ингредиентов и коэффициенты уравнений регрессии. Поскольку параметры уравнений регрессии входили в уравнения нелинейно, то для их оценки была использована процедура, состоявшая из нескольких шагов, включавшая начальное оценивание и последующее уточнение методом оптимизации.

Таким образом, для четырех исследованных констант вычислялись коэффициенты соответствующих уравнений регрессии.



Предложенная методика расчета коэффициентов уравнений регрессии была использована для обработки результатов испытаний опытных и серийных резин и создания базы данных параметров упругих и вязкоупругих свойств шинных резин ОАО ЯШЗ. Была проведена проверка адекватности

Рис.4. Корреляция между экспериментальными и расчетными значениями константы  $C_1$  и  $C_3$

моделей и применимости их для решения задачи оптимизации состава резины при использовании в качестве критериев оптимальности физико-механических показателей резины. На рис. 4, в качестве примера, приведены данные,

иллюстрирующие корреляцию между экспериментальными значениями упругих констант  $C_1$  и  $C_3$  и значениями, рассчитанными по уравнениям регрессии. Как видно, наблюдается удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных данных. В связи с тем, что все полученные математические модели удовлетворяют статистическому критерию адекватности, точность предсказания значений параметра по математической модели для конкретной резиновой смеси определяется величиной ошибки измерения данного параметра.

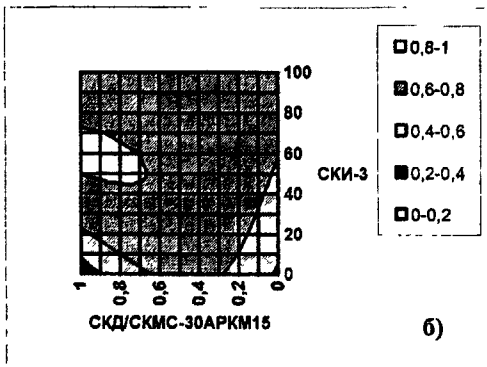
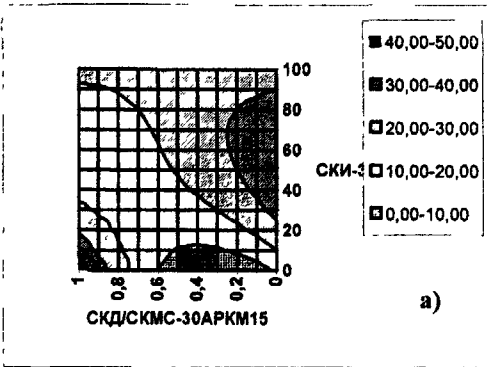


Рис.5. Влияние соотношения каучуков на: а) константу  $\tau$  (цифрами на легенде указано время релаксации в секундах) б)  $C_1$  (цифрами на легенде указано значение параметра в МПа).

исследованных опытных резин. Поскольку зависимость параметров от дозировки каучуков описывается уравнениями второго порядка, для удобства работы зависимости констант от соотношения каучуков представлены

Таким образом, полученный в результате расчета массив значений коэффициентов уравнений регрессии может быть использован для вычисления значений параметров упругих и вязкоупругих свойств резин произвольного состава.

Для практического использования разработанных математических моделей были созданы пользовательские функции на языке VBA. Для вычисления параметров резин заданного состава было создано приложение в пакете Microsoft Excel, в котором в зависимости от содержания ингредиентов автоматически вычисляются значения констант:  $C_1$ ,  $C_3$ ,  $\eta$ ,  $\tau$  соответствующих данному рецепту. В качестве примера был проведен расчет параметров всех

графически в виде линий уровня - проекций сечений поверхностей отклика гиперплоскостями, соответствующими постоянному значению параметра, на плоскость переменных ( $\alpha$ , ХК1), где  $\alpha$  - соотношение каучуков СКД/СКМС-30АРКМ15, ХК1 - дозировка СКИ-3. Выше (рис.5) приведены примеры графиков таких сечений для резины, содержащей 2 мас.ч. природной серы, 50 мас.ч. технического углерода П-514 и 15 мас.ч. масла ЯП-1.

Используя данные контурные карты можно выбрать области соотношений каучуков, отвечающие заданному значению соответствующей константы. Устанавливая различные значения остальных ингредиентов можно проанализировать, как изменяются границы этой области при варьировании состава смеси. Выбрав диапазоны изменения ингредиентов, представляющие наибольший интерес с точки зрения достижения заданного уровня упругих и вязкоупругих свойств резины, можно поставить и решить задачу оптимизации состава резиновой смеси.

В настоящей работе была обобщена информация по результатам испытаний серийных резин, применяемых в производстве ОАО "ЯШЗ" для различных деталей шин с целью создания базы данных параметров упругих и вязкоупругих свойств.

**В пятой главе** работы приведен пример использования созданных математических моделей для изменения напряженно-деформированного состояния шины за счет оптимизации состава резин. Исследовано напряженно-деформированное состояние одного из вариантов шины типоразмера 225/75R16 при посадке на обод. Эта задача является достаточно удобной для решения методом конечных элементов, поскольку может быть решена в осесимметричной постановке.

Исходная геометрическая модель шины была создана в пакете AutoCAD и передана в пакет ANSYS в формате IGES. Распределение материалов в покрышке представлено на рис. 6. Рассматриваемая бескамерная радиальная шина имеет два слоя текстильного каркаса и три слоя металлокордного брекера.

Оценка упругих коэффициентов резин производилась на основании результатов испытаний резин в соответствии со спецификацией по разработанной в настоящей работе методике.

Модель покрышки рассматривалась как осесимметричная относительно оси У и симметричная относительно экваториальной плоскости ХОZ. На граничную поверхность покрышки по экваториальной плоскости накладывались граничные условия, отвечающие симметрии модели.

При проведении расчетов моделировалось:

- ♦ Надевание покрышки на обод, путем перемещения площади обода до оси симметрии Х. Опорная поверхность была закреплена. При этом тело покрышки находится без нагрузок и перемещается относительно площади обода только за счет сил трения.

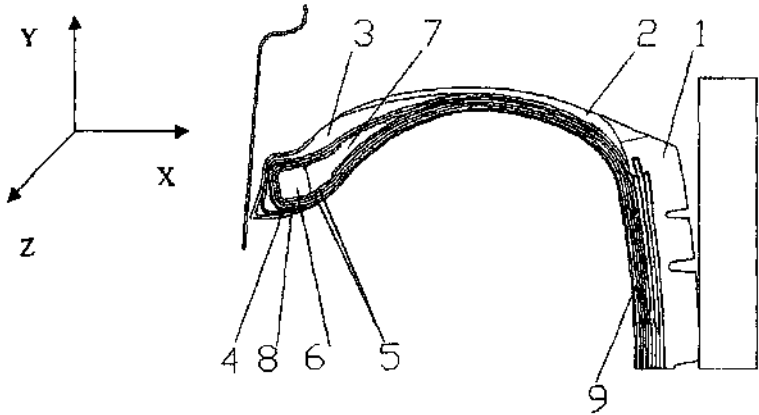
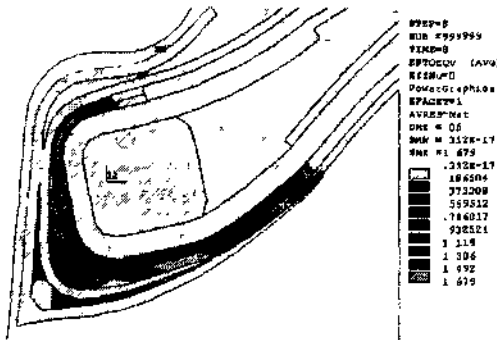


Рис. 6. Распределение материалов в шине. 1- протектор; 2- боковина; 3 - надбортовая резиновая деталь; 4 - гермослой; 5 - каркас; 6 - бортовое кольцо; 7 - наполнительный шнур; 8 - прослойка каркаса; 9 - брекер.

- ♦ Нагружение покрышки внутренним давлением до рабочего (0,25 МПа).
- ♦ Приложение перемещения к площадке, имитирующей радиальную нагрузку, на заданную величину.



В процессе проведения расчетов было рассчитано распределение эквивалентных деформаций Мизеса нагруженной рабочим давлением и обжатой на опорную поверхность. Анализ НДС показал, что в шине имеется область, в которой эквивалентные деформации существенно превышают среднее значение. Область наибольших деформаций

Рис. 7. Область наибольших эквивалентных деформаций шины в зоне борта (цифры на легенде соответствуют деформации в относительных единицах).

Таблица 1. Максимальные значения главных напряжений и главных деформаций в прослойке каркаса и гермослое в начальной и оптимальной вершине симплекса

Вершина симплекса	Прослойка каркаса						Гермослой					
	Главные напряжения, МПа			Главные деформации			Главные напряжения, МПа			Главные деформации		
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$
начальная	2,1	1,67	1,23	0,87	0,007	-0,21	2,1	1,67	1,23	0,98	0,009	-0,97
оптимальн	2,03	1,59	1,18	0,89	0,007	-0,29	2,03	1,59	1,18	0,89	0,009	-0,89

15

Таблица 2. Максимальные значения эквивалентных напряжений и эквивалентных деформаций в прослойке каркаса и гермослое в начальной и оптимальной вершине симплекса

Вершина симплекса	Прослойка каркаса			Гермослой		
	$\sigma_{экв}$ , МПа	$\epsilon_{экв}$ , МПа	$\sigma_{экв}(1+\epsilon_{экв})$ , МПа	$\sigma_{экв}$ , МПа	$\epsilon_{экв}$ , МПа	$\sigma_{экв}(1+\epsilon_{экв})$ , МПа
начальная	2,24	0,56	3,49	1,49	1,68	3,99
оптимальн	2,13	0,507	3,21	1,42	1,52	3,58

(рис. 7) расположена в бортовой зоне покрышки, а перегруженными деталями являются гермослой и прослойка каркаса. Причиной перегрузки данных деталей является неудачно выбранная форма профиля борта шины-прототипа по вулканизационной форме, что становится ясно из анализа профиля распределения контактных давлений. Перегруженность носка является причиной больших деформаций в резиновых деталях около бортового кольца.

Описанный недостаток был устранен за счет оптимизации состава резины в контактирующих деталях. Для решения задачи оптимизации был использован один из методов апостериорного планирования эксперимента - симплексный поиск. В качестве критерия оптимальности использовалась функция главных напряжений и деформаций, представляющая собой разность произведений максимальных эквивалентных напряжений и деформаций в контактирующих деталях шины (табл. 1 и табл. 2). По результатам расчета, была произведена корректировка состава резин в контактирующих деталях гермослойе и прослойке каркаса в зоне борта, что позволило уменьшить вероятность возникновения дефектов в данной области в процессе эксплуатации.

## ВЫВОДЫ

1. Для устранения дефектов конструкции шин, а также оптимизации упругих и прочностных свойств резин ее деталей путем анализа напряженно-деформированного состояния шины методом конечных элементов, разработана методика расчетной оценки вязкоупругих констант шинных резин на основании их состава, основанная на феноменологической модели вязкоупругих свойств резин при одноосном растяжении.
2. В результате экспериментальных исследований установлены количественные соотношения между содержанием, а также типом, базовых ингредиентов шинных резиновых смесей и параметрами упругих и вязкоупругих свойств резин на их основе, использованные для построения их математических моделей.
3. Выявлен эффект анизотропии структурной пластичности резин, заключающийся в зависимости степени размягчения резин при повторных деформациях от направления действия нагрузки в предыдущем цикле растяжения, что позволило прояснить роль вулканизирующего агента и наполнителя в механизмах гистерезисных потерь в резинах при однократной и циклической деформации.
4. На основании теоретического и экспериментального исследования влияния структуры и состава резин на их вязкоупругие свойства предложены математические модели для описания зависимостей параметров равновесных упругих и вязкоупругих свойств от типа и дозировок базовых



ингредиентов шинных резин: соотношения каучуков, типа и содержания серы, типа и содержания технического углерода и мягчителя.

5. Предложенные математические модели, являющиеся уравнениями регрессии в виде произведений функций, зависящих от содержания и типа серы, технического углерода и масла позволяют решить задачу оптимизации состава резин деталей шины по результатам анализа ее напряженно-деформированного состояния при использовании в качестве критериев оптимальности функций главных напряжений и деформаций в контактирующих деталях.
6. Разработана и апробирована методика экспериментальной оценки параметров математических моделей и приложения для автоматизированной обработки экспериментальных данных, позволяющие рассчитывать массив значений параметров. Результаты экспериментальной оценки работоспособности методики говорят о возможности ее практического применения для расчета значений параметров упругих свойств шинных резин.
7. На основании исследования влияния упругих коэффициентов контактирующих деталей на напряженно-деформированное состояние в наиболее перегруженной области шины определено оптимальное соотношение упругих коэффициентов, позволившее уменьшить вероятность возникновения дефектов в данной области в процессе эксплуатации шины.
8. Созданные в результате методики испытаний и расчетов, а также базы данных параметров упругих и вязкоупругих свойств резин, внедренные на ОАО "Ярославский шинный завод", позволяют использовать при проектировании шин в полной мере возможности универсальных конечно-элементных пакетов программных средств. Это в свою очередь позволяет добиться существенного сокращения времени и затрат на подготовку проектов; за счет проведения вариантных расчетов и решения задач оптимизации, повысить обоснованность вновь создаваемых конструкций шин. В результате было достигнуто существенное повышение ходимости вновь созданных моделей шин, исключено появление дефектов, причины которых до внедрения данной работы не были установлены.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

- 1 Соловьев М.Е., Раухваргер А.Б., Капустин А.А. Определение параметров равновесных упругих и вязкоупругих свойств резин при одноосном растяжении // В кн.: Проблемы шин и резинокордных композитов. Сб. докл. 11 симпозиума. - М.: НИИШП. -2000. - С. 150-158.
- 2 Капустин А.А. Применение параметров вязкоупругих нелинейных свойств резин в автоматизированном проектировании шин // В сб. докл. Первой научно-

технической конференции молодежных разработок. (Ярославль, 11 октября 2002 г.). - Ярославль: Изд. Ремдер. - 2002. - С. 84-88.

3 Капустин А.А., Соловьев М.Е. Влияние типа и дозировки технического углерода и серы на параметры вязкоупругих свойств шинных резин // В сб. докл. 1-ой Всеросс. конф. по каучуку и резине (Москва, 26-28 февраля 2002 г.). - М.: Министерство промышленности, науки и технологии РФ. - 2002. - С. 233-237.

4 Соловьев М.Е., Раухваргер А.Б., Капустин А.А. Феноменологическая модель вязкоупругих свойств резин при одноосном растяжении // Каучук и резина. - 2002.- №4.- С. 3-7

5 Капустин А.А., Соловьев М.Е., Шумилов И.В. Влияние состава на параметры упругих потенциалов шинных резин // В кн.: Проблемы шин и резинокордных композитов. Сб. докладов 14 симпозиума. Т2. М.: НИИШП. - 2003. - С.196-203.

6 Мазин А.В., Соловьев М.Е., Капустин А.А. Численный анализ напряженно-деформированного состояния легкой шины в зоне борта // В сб. 13 симпозиума "Проблемы шин и резинокордных композитов". - М: НИИШП.- 2002. - Т. 2. - С. 22-28.

7 Мазин А.В., Соловьев М.Е., Капустин А.А. Численный анализ равновесной конфигурации радиальной шины при нагружении внутренним давлением // В сб. трудов международного форума по проблемам науки, техники и образования / под редакцией В.П. Савиных, В.В. Вишневого. - М: Академия наук о земле. 2002. - Т. 2. - С. 114-115.

8 Мазин А.В., Соловьев М.Е., Капустин А.А. Численная оценка эффективных упругих коэффициентов композиционных материалов с непрерывными волокнами // В сб. трудов международной научно – технической конференции "Полимерные композиционные материалы и покрытия POLYMER 2002", - Ярославль: ЯГТУ.- 2002. - С. 131-133.

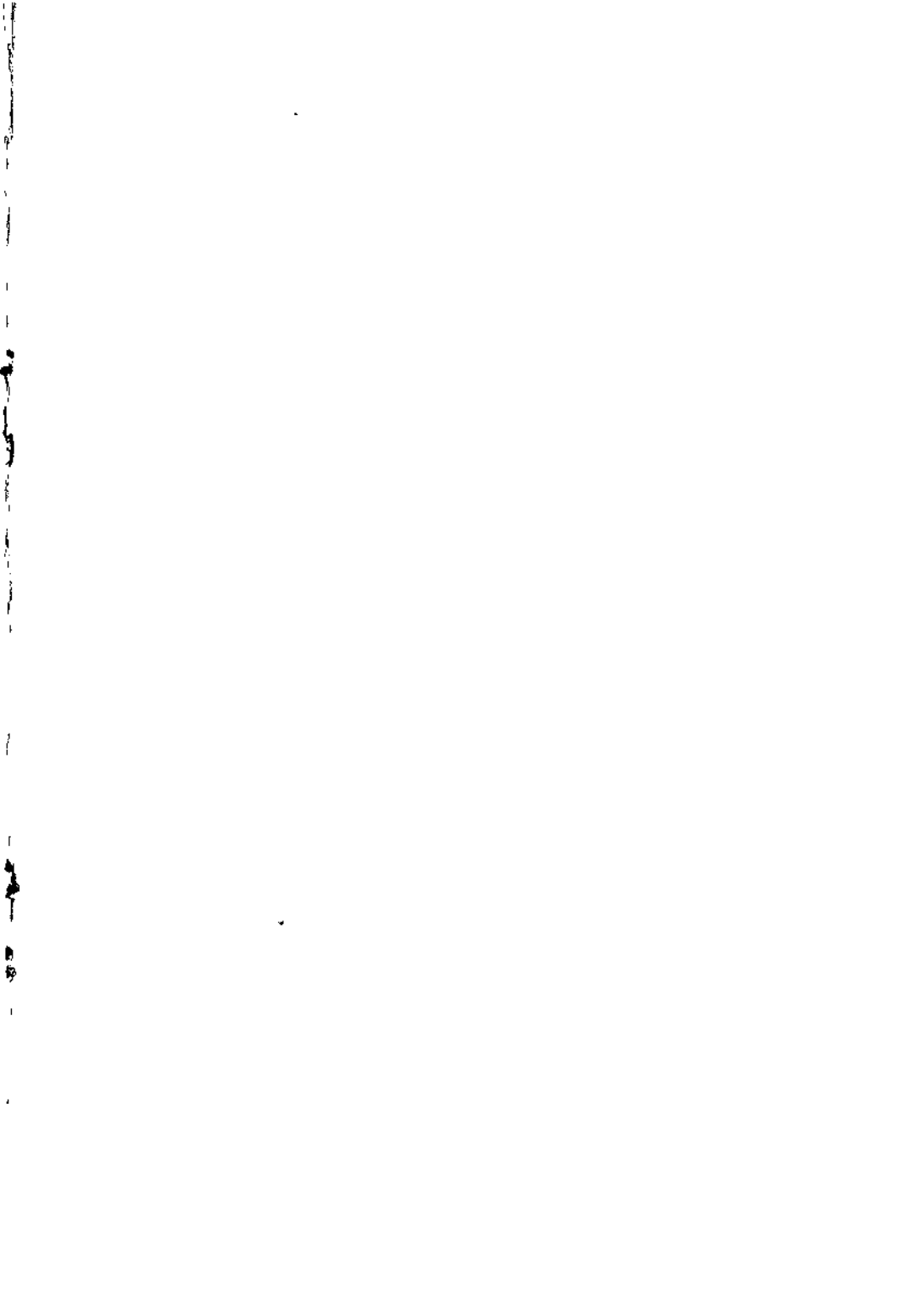
9 Соловьев М.Е., Мазин А.В., Капустин А.А. Численная оценка эффективных упругих коэффициентов композиционных материалов с непрерывными волокнами // Известия вузов: Химия и химическая технология. Иваново. - 2003. - т. 46. - вып. 3. - С. 47-50.

Лицензия ПД 00661 Формат 60x84 1/16. Печ. л. 1.

Заказ 264. Тираж 100.

Отпечатано в типографии Ярославского государственного  
технического университета

150028, г. Ярославль, ул. Советская, 14 а, т. 30-56-63.



№ -3 29 1

РНБ Русский фонд

2004-4

32954