

Днепропетровский институт инженеров железнодорожного
транспорта

УДК 539.3:629.113.012.55

На правах рукописи

КВАША Эдуард Николаевич

**КОНТАКТНЫЕ ЗАДАЧИ
АНИЗОТРОПНЫХ СЛОИСТЫХ ОБОЛОЧЕК
ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН**

05.23.17 - строительная механика

**Диссертация
на соискание ученой степени
доктора технических наук
в форме научного доклада**

Днепропетровск - 1992

Работа выполнена в Днепропетровском Научно-исследовательском институте крупногабаритных шин.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор А.О.Расказов
доктор технических наук, профессор Н.Г.Тамуров
доктор технических наук, профессор Л.В.Андреев

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт шинной промышленности г.Москва.

Защита диссертации состоится "12" ноября 1992 г.
в 14 час. на заседании специализированного совета Д 114.07.02
Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта по специальности "Строительная механика" по адресу:
320700, Днепропетровск, ул.академика Лазаряна, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ДИИТа.

Автореферат разослан "5" октября 1992 г.

Ученый секретарь специализированного совета

к.т.н., доцент



В.В.Татарчук

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00816139 (S)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации сформулированы и решены контактные задачи для пневматических шин на основе модели анизотропной слоистой оболочки. Дорожное покрытие может быть упругим и абсолютно твердым. Нагрузки, действующие на шину, учитывают силы инерции вращения при стационарном качении.

Актуальность темы. Пневматические шины используются в технике уже свыше 100 лет. Ежегодно во всем мире выпускается несколько сот миллионов шин для легковых и грузовых автомобилей, сельскохозяйственной техники, авиации и космических кораблей. Основным видом транспорта при открытом способе добычи полезных ископаемых являются карьерные самосвалы большой и особо большой грузоподъемности (до 250 т). Существенная доля в транспортных расходах приходится на стоимость пневматических шин.

Повышение их надежности и ресурса имеет важное народнохозяйственное значение.

Исследования по механике пневматических шин начались в 30-е годы и получили интенсивное развитие в последнее время в связи с использованием новых материалов и созданием принципиально новых конструкций шин.

Обзор научной литературы показывает, что для создания оптимальной конструкции шины на стадии проектирования необходимо использовать теорию анизотропных слоистых оболочек. Это обусловлено тем, что материал шин является армированной средой с существенно различными жесткостными и прочностными свойствами, а взаимодействие с дорогой относится к классу контактных задач теории оболочек. Использование теории анизотропных слоистых оболочек для моделирования термонапряженного состояния шин позволяет прогнозировать ресурс изделия на стадии проектирования.

Поэтому тема данной диссертационной работы актуальна и имеет теоретическое и практическое значение.

Цель работы: Исследование фундаментальных закономерностей термонапряженного состояния пневматической шины при стационарном

качении и разработка математических моделей на основе теории анизотропных слоистых оболочек; оценка точности известных теорий; решение сложных конкретных задач практики проектирования шин с применением разработанной теории; разработка комплекса программ для удобства практического использования.

Научная новизна работы:

1. Сформулирована и решена контактная задача для пневматической шины как анизотропной слоистой оболочки с учетом шести составляющих обобщенной реакции в области контакта.

2. Разработаны математические модели пневматической шины на основе различных вариантов теории анизотропных слоистых оболочек.

3. Исследованы с помощью разработанных моделей фундаментальные закономерности термонапряженного состояния шины при стационарном качении.

4. Решены прикладные задачи механики восстановленных шин, что позволило увеличить надежность и ресурс.

5. Исследованы особенности взаимодействия оболочки шины с упругим основанием с учетом дискретно расположенных грунтозацепов.

Практическая ценность работы заключается в том, что результаты диссертационной работы позволяют исследовать термонапряженное состояние пневматических шин более обоснованно и точно, так как математическая модель шины как анизотропная слоистая оболочка учитывает в полном объеме особенности контактного взаимодействия с дорогой, чего не могли учесть ранее применявшиеся модели.

Разработан комплекс программ с целью оптимизации напряженно-деформированного состояния и прогнозирования ресурса пневматических шин.

Внедрение. Разработанные математические модели решения контактных задач пневматических шин внедрены в виде инженерных методик, алгоритмов, комплекса программ при проектировании в НИИКТШ крупно- и сверхкрупногабаритных шин карьерных самосвалов, шин для сельскохозяйственной техники и строительно-дорожных машин.

Экономический эффект от внедрения результатов работы в НИИКТШ составил 1,5 млн. руб.

Выполнены расчеты некоторых типов шин по заказу НИИШП, ПО "Нижнекамскшина", Воронежского шинного завода.

Результаты работы внедрены в учебном процессе кафедры химии

и технологии переработки эластомеров Днепропетровского химико-технологического института.

Автор защищает приоритетное научное направление в области механики контактного взаимодействия анизотропных слоистых оболочек пневматических шин с дорогой, решающее крупную народнохозяйственную задачу создания экономичных и долговечных шин.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, симпозиумах и семинарах:

Международных конференциях по каучуку и резине (Киев, 1978; Москва, 1984; Пекин, 1992);

IX Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин (Ленинград, 1973);

III и IV Всесоюзных конференциях по статике и динамике пространственных конструкций (Киев, 1972, 1978);

Республиканской конференции по воздействию динамических нагрузок на элементы конструкций (Харьков, 1974);

VII Всесоюзной конференции по прочности и пластичности (Горький, 1978);

II и V Всесоюзных и VI Международной научно-технических конференциях по методам расчета изделий из высокоэластичных материалов (Рига, 1980, 1983, 1992);

II и III Всесоюзных конференциях по смешанным задачам механики деформируемого тела (Днепропетровск, 1981, Харьков, 1985);

Всесоюзном симпозиуме по нелинейным задачам теории оболочек (Саратов, 1981);

I и II Всесоюзных конференциях по прочности, жесткости и технологичности изделий из композиционных материалов (Каме-нец-Подольск, 1981, Запорожье, 1989);

Всесоюзной конференции по научным основам и путям создания шин и технологии их производства уровня 2000 года (Москва, 1989);

I - III Всесоюзных симпозиумах по проблемам шин и резино-кордных композитов (Москва, 1989, 1990, 1991);

Семинарах по механике твердого деформируемого тела под руководством Э. И. Григолюка (Москва, МАМИ, 1985, 1986);

Научном семинаре лаборатории механики композитных материалов под руководством Г. А. Ванина (Москва, ИМАШ им. Благонравова, 1988);

Научном семинаре по строительной механике НТО стройиндустрии

под руководством А. В. Плеханова (Днепропетровск, 1992);

Конференции Воронежского инженерно-строительного института (Воронеж, 1991).

Публикации. Основные результаты работы изложены в 37 публикациях, в том числе: статей- 29, монографии "Эксплуатация и ремонт крупногабаритных шин (в соавторстве со Э. С. Скорняковым, А. А. Хоменей, В. П. Бойковым), тезисы докладов- 7, авторское свидетельство-1. Восемь работ выполнены без соавторов. В совместных работах автору принадлежат: теоретические исследования по контактному взаимодействию оболочки с основанием, разработка алгоритмов и комплекса программ решения контактных задач и выполнение решений конкретных задач на ЭВМ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В В Е Д Е Н И Е

Пневматическая шина по своему функциональному назначению является связующим звеном между двумя принципиально разнородными объектами - машиной и дорогой. В системе машина-дорога возникают динамические нагрузки, величина которых зависит от параметров всех ее элементов. Точное решение динамической задачи для такой системы с учетом всех ее особенностей и неголономных связей шины с дорогой в настоящее время не представляется возможным даже с помощью супер-компьютеров.

В общей механике можно условно выделить задачи для системы к задачам внешней или аналитической механики, а для элементов системы - к задачам внутренней или прикладной механики.

Ниже рассматриваются некоторые задачи внутренней механики одного из элементов системы - пневматической шины. Основными задачами являются расчет напряженно-деформированного и теплового состояния шины при действии эксплуатационных нагрузок. Решение этих задач позволит прогнозировать ресурс шины до и после ее ремонта и, следовательно, ее экономическую эффективность.

Пневматическая шина является анизотропной слоистой тороидальной оболочкой переменной толщины, контактирующей с дорожным покрытием, что делает расчет напряженно-деформированного состояния шины весьма сложным. В связи с этим, из динамических сил учиты-

ваются только силы инерции вращения при стационарном качении шины. Боковые нагрузки, крутящие моменты в плоскости дороги учитываются как статически приложенные, но их величина соответствует максимальным динамическим нагрузкам и получены они путем испытаний в условиях реальной эксплуатации.

Исследования по механике пневматических шин начались в 30-е годы. Фундаментальные результаты получены в трудах В. Л. Бидермана, А. В. Лапина, Б. Л. Бухина, W. Hofferberth, R. B. Day, S. D. Gehman, J. F. Purdy и других. Шина моделировалась безмоментной сетчатой оболочкой и рассматривалась только осесимметричная задача. В работах И. К. Николаева и О. В. Фотинич решена задача о контактном взаимодействии безмоментной оболочки с твердой дорогой.

В 70-е годы были опубликованы работы А. П. Прусакова, И. К. Николаева, Э. Н. Кваши, W. Brever, S. K. Clark, J. T. Tielking, C. V. Budd, в которых шина моделировалась ортотропной моментной оболочкой.

В начале 80-х годов Э. И. Григолюк, Л. Г. Корнейчук, Г. М. Куликов, П. Я. Носатенко опубликовали работы, в которых шина моделировалась анизотропной моментной оболочкой. Были выявлены новые эффекты в распределении усилий в нитях корда.

В работах Ю. Н. Новичкова и А. С. Кузьмина дополнительно учтена физическая нелинейность резины и корда.

В конце 80-х годов были опубликованы работы А. Е. Белкина, О. Б. Третьякова, С. Л. Соколова, в которых шина моделировалась трехслойной анизотропной оболочкой.

Интерес к механике пневматических шин в последнее время заметно увеличивается в связи с появлением новых материалов и созданием принципиально новых конструкций шин. Математические модели пневматических шин постоянно усложняются с целью повышения точности расчетов, сокращения сроков и стоимости проектирования шин.

В настоящей работе решены задачи прочности и жесткости пневматических шин, рассчитаны температурные поля в ее элементах, определены расчетным путем сила сопротивления качению и ресурс. Все эти результаты получены, рассматривая шину с позиций механики слоистых анизотропных оболочек.

Глава 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБОЛОЧКИ ШИНЫ С ДОРОЖНЫМ ПОКРЫТИЕМ В КОНТАКТНОЙ ЗОНЕ

Создание оптимальной конструкции пневматической шины невозможно без проведения на стадии проектирования расчетного и экспериментального анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) шины и ее конструктивных элементов на действии эксплуатационных нагрузок. Все разнообразие эксплуатационных нагрузок с позиций механики можно представить шестью компонентами нагружения: тремя силовыми и тремя моментными.

В результате нагружения оболочка шины деформируется, в месте контакта с дорогой возникают нормальные и касательные напряжения, которые должны уравновесить внешние нагрузки (рис. 1). Такие задачи в механике называются контактными задачами. При их решении необходимо найти не только контактные напряжения и размеры зоны контакта, но и напряженно-деформированное состояние шины в каждой ее точке.

При этом следует отметить, что корректно поставленная задача предполагает наличие односторонних связей в зонах контакта в процессе нагружения, т.е. возможность изменения размеров и форм контактных зон.

В частности, для пневматических шин в контактной зоне возможно возникновение только сжимающих нормальных напряжений, а касательные напряжения могут быть произвольными по направлению, но не могут превосходить по модулю нормальных напряжений, умноженных на коэффициент трения. Следовательно, при некоторых нагрузках и параметрах шины в пятне контакта возможно микроскольжение элементов протектора относительно дороги.

В настоящей работе использована математическая модель моментной анизотропной тороидальной оболочки с учетом деформаций межслойного сдвига каркаса и конечной жесткости бортовых колец. В контактной зоне учтены перечисленные выше особенности и кривизна дорожного покрытия.

Перемещения шины определяются в процессе решения задачи по заданным значениям радиальной, горизонтальных и моментных нагрузок. Принимая для протектора гипотезу Винклера, запишем деформации в контактной зоне (рис. 2)

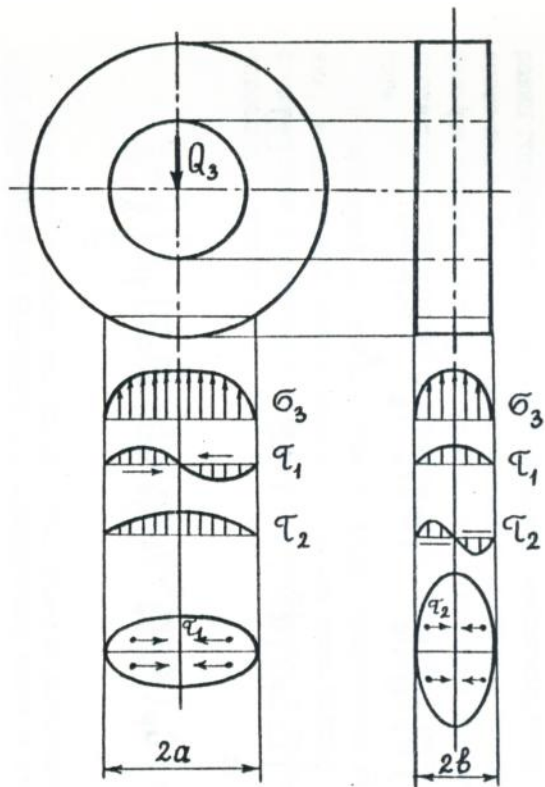


Рис. 1. Распределение контактных напряжений при действии вертикальной нагрузки.

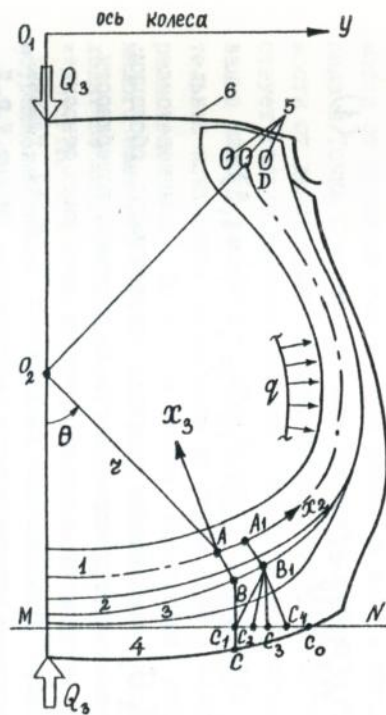


Рис. 2. Расчетная схема контакта оболочки шины с дорогой: 1 - каркас, 2 - брекер, 3 - подканавка, 4 - протектор, 5 - бортовые кольца, 6 - обод.

$$\begin{aligned} \varepsilon_p = (U_1 \sin \alpha_1 + U_2 \sin \alpha_2 + U_3 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 - \\ - h_p - W_k) / h_p = 0 ; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\delta_{ip} = (U_{ip} - U_i \cos \alpha_i + U_3 \sin \alpha_i) / h_p ; \quad (i=1,2)$$

где U_1, U_2, U_3 - перемещения наружной поверхности оболочки; W_k - расстояние от поверхности обжатия до наружной поверхности оболочки; U_{ip} - горизонтальные перемещения всей шины относительно дороги; α_i - углы наклона касательных к линиям главных кривизн в окружном и меридиональном направлениях. Индекс "р" обозначает принадлежность соответствующего деформационного или силового фактора протектору. Все не оговоренные обозначения соответствуют обозначениям опубликованных работ автора и являются общепринятыми в механике деформируемых систем.

По площадке контакта F_c должны выполняться условия равновесия

$$\begin{aligned} P_i = \int_{F_c} G_p \delta_{ip} dF_c ; \quad (i=2); \quad P_3 = \int_{F_c} E_p \varepsilon_p dF_c ; \\ M_i = \int_{F_c} E_p \varepsilon_p \chi_i dF_c ; \quad (i=2); \\ M_3 = \int_{F_c} G_p (\delta_{1p} \chi_2 + \delta_{2p} \chi_1) dF_c . \end{aligned} \quad (2)$$

Шесть условий равновесия (2) позволяют моделировать все возможные эксплуатационные нагружения при качении шины, в том числе, с учетом заданного "развала - схождения" колес.

Рассмотрим основные случаи нагружения шины. На рис. 2 показано, что точки А, В, С при деформации оболочки шины занимают положение А', В', С'. Положение точек А' и В' определяется в зависимости от принятых гипотез для оболочки шины в процессе решения задачи. Точка С' может занимать четыре положения С - С' в зависимости от действующих на шину внешних нагрузок. Пусть на шину действует только вертикальная нагрузка. В первом случае проскальзывание малого элемента в окрестности точки С' отсутствует, касательные контактные напряжения не равны нулю и являются самоуравновешенными. Во втором случае происходит микроскольжение малого элемента протектора, если касательные напряжения превосходят по модулю нормальные напряжения, умноженные на коэффициент трения. Как и в первом случае касательные напряжения являются самоуравновешенными. В третьем случае принято, что поверхность дороги абсолютно гладкая. Происходит свободное скольжение элементов протектора в противоположных направлениях. Во всех точках контактной зоны касательные напряжения равны нулю. В четвертом случае предполагается, что на шину кроме вертикальной действует горизонтальная нагрузка. В контактной зоне возникают несамобалансированные касательные напряжения, которые в сумме должны быть равны горизонтальной нагрузке. Возможно микроскольжение элементов протектора. При больших горизонтальных нагрузках наступает предельный случай, когда микроскольжение охватывает все элементы протектора - происходит скольжение всей шины по шероховатой дороге.

В настоящей работе для решения задач применяется метод решения, использующий полную энергию оболочки шины. Поэтому запишем в соответствии с гипотезой Винклера и формулами (1) энергию деформации протектора

$$\mathcal{E}_p = \frac{1}{2} \int_{F_c} h_p [E_p \varepsilon_p^2 + G_p (\gamma_{1p}^2 + \gamma_{2p}^2)] dF_c \quad (3)$$

В случае наличия массивных грунтозацепов дополнительно учитывается изгибная жесткость протектора.

Таким образом, сформулирована контактная задача для пневматической шины независимо от принятых гипотез для оболочки шины.

Глава 2. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И МЕТОД РЕШЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ СЛОИСТЫХ АНИЗОТРОПНЫХ ОБОЛОЧЕК ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН

Современные пневматические шины отличаются большим разнообразием конструкций. Это связано не только с традиционным делением по типу армирования их на диагональные и радиальные. В последние годы в классе диагональных шин разработаны конструкции крупно- и сверхкрупногабаритных шин (КГШ и СКГШ). При их создании потребовалось не механическое увеличение слоев, а оптимальное распределение кордного материала по толщине оболочки, как по углу наклона и плотности нитей, так и по другим параметрам.

При воздействии эксплуатационных нагрузок оболочка шины в контактной зоне прогибается на величину в 2-3 раза превышающую толщину. Отсюда следует, что для решения контактной задачи необходимо использовать нелинейные уравнения теории упругости анизотропного тела. Такие уравнения получены в работах В. В. Новожилова, С. Г. Лехницкого и др. В настоящей работе эти уравнения объединены для описания контактной задачи анизотропной тороидальной оболочки пневматической шины.

2.1. Функционал полной энергии оболочки шины. Решение нелинейной краевой задачи возможно с помощью аналитических и численных методов. При всем их разнообразии они приводят нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных к системе нелинейных алгебраических уравнений, которые решаются методом последовательных приближений на ЭВМ. Получение и решение системы нелинейных алгебраических уравнений высокой размерности связано со значительными математическими трудностями.

Возможен принципиально иной подход: использовать метод последовательных приближений на более раннем этапе решение, не прибегая к формированию нелинейных алгебраических уравнений. Для этого используем энергетический метод решения контактной задачи.

Известно, что функционал полной энергии упругой системы обладает свойством минимальности для действительных значений неизвестных функций. Запишем функционал полной энергии для анизотропной слоистой оболочки без привлечения технических гипотез

для трехмерного напряженно-деформированного состояния

$$\begin{aligned} \mathcal{J} = & \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m \int_{V_k} (\sigma_{11}^k \varepsilon_{11}^k + \sigma_{12}^k \varepsilon_{12}^k + \sigma_{22}^k \varepsilon_{22}^k + \\ & + \sigma_{13}^k \varepsilon_{13}^k + \sigma_{23}^k \varepsilon_{23}^k + \sigma_{33}^k \varepsilon_{33}^k) dV_k + \mathcal{J}_p - \quad (4) \\ & - q \int_F (U_1 \sin \alpha_1 + U_2 \sin \alpha_2 + U_3 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2) dF - \\ & - \sum_{\ell=1}^3 (Q_\ell U_\ell^* + M_\ell \beta_\ell^*) \end{aligned}$$

где V_k - объем k -го слоя оболочки; F - внутренняя поверхность оболочки; Q_ℓ, M_ℓ - внешние силы и моменты; U_ℓ^*, β_ℓ^* - обобщенные перемещения и углы поворота штампа; α_1, α_2 - углы наклона касательных соответственно в окружном и меридиональном направлениях.

2. 2. Краевые условия оболочки шины. Тороидальная оболочка шины замкнута в окружном направлении, следовательно, краевые условия должны удовлетворять условию периодичности. В меридиональном направлении краевые условия связаны с конструктивными особенностями закрепления шины на металлическом ободе, а именно: слои оболочки закрепляются на бортовых кольцах. Такое закрепление является упругим, зависит от жесткости на растяжение стальных бортовых колец и учитывается в разработанном комплексе программ при минимизации функционала полной энергии.

Кроме этих условий необходимо выполнить условия на лицевых поверхностях шины: на внутренней поверхности нормальные напряжения равны внутреннему давлению; на наружной поверхности в контактной зоне нормальные и касательные напряжения не равны нулю.

И, наконец, необходимо выполнить условия сопряжения слоев как по напряжениям, так и по перемещениям.

2. 3. Численный метод решения контактной задачи. Для минимизации функционала и, следовательно, нахождения неизвестных функций теоретически возможно использование аналитических методов.

Но учитывая нелинейность деформаций, анизотропию материала, сложность геометрии тороидальной оболочки и ,наконец, что задача относится к классу контактных, использование аналитических методов не представляется возможным.

Среди численных методов решения наиболее подходящим для решения такой задачи является метод локальных вариаций. Этот метод не имеет ограничений по типу нелинейности и размерности задачи, легко программируется и не требует составления и решения системы нелинейных уравнений. Недостатком метода локальных вариаций является длительность решения задач, что обусловлено пошаговым методом варьирования неизвестных функций в каждой точке сеточной области. Для устранения этого недостатка автором был разработан блочный способ варьирования неизвестных функций (рис. 3).

На основе метода локальных вариаций разработан комплекс программ на языке ФОРТРАН, который состоит из пятидесяти модулей и позволяет рассчитывать диагональные и радиальные шины на все типы эксплуатационных нагрузок. Для ЭВМ с реальной скоростью счета 1 млн. операций в секунду время решения контактной задачи около 30 мин.

Алгоритм решения контактной задачи реализован в двух вариантах. Первый вариант: задана величина внешней нагрузки, по которой определяется деформация шины. Второй вариант: задано какое-либо перемещение шины, по которому определяется действующее усилие на шину. Как показали расчеты, первый вариант чаще используется в практике проектирования, т. к. обычно величина радиальной, горизонтальных и моментных нагрузок известна по техническому заданию на шину. При решении контактной задачи нагрузки прикладываем ступенями до номинального значения за 3 - 4 этапа. Это позволяет построить нагрузочную характеристику для шины, которая обычно является нелинейной. После достижения номинальных нагрузок на шину, вычисляем усилия в нитях корда, напряжения в резине, деформации каркаса. Контактные давления и размеры пятна контакта определяются автоматически в процессе счета.

Второй вариант используется реже, в основном для специальных режимов нагружения. Например, когда требуется определить напряженно-деформированное состояние шины, имеющей заданные углы развала - схождения колес.

В течение последних лет Комплекс программ модернизировался путем уточнения расчетных схем всей шины и ее элементов. При этом,

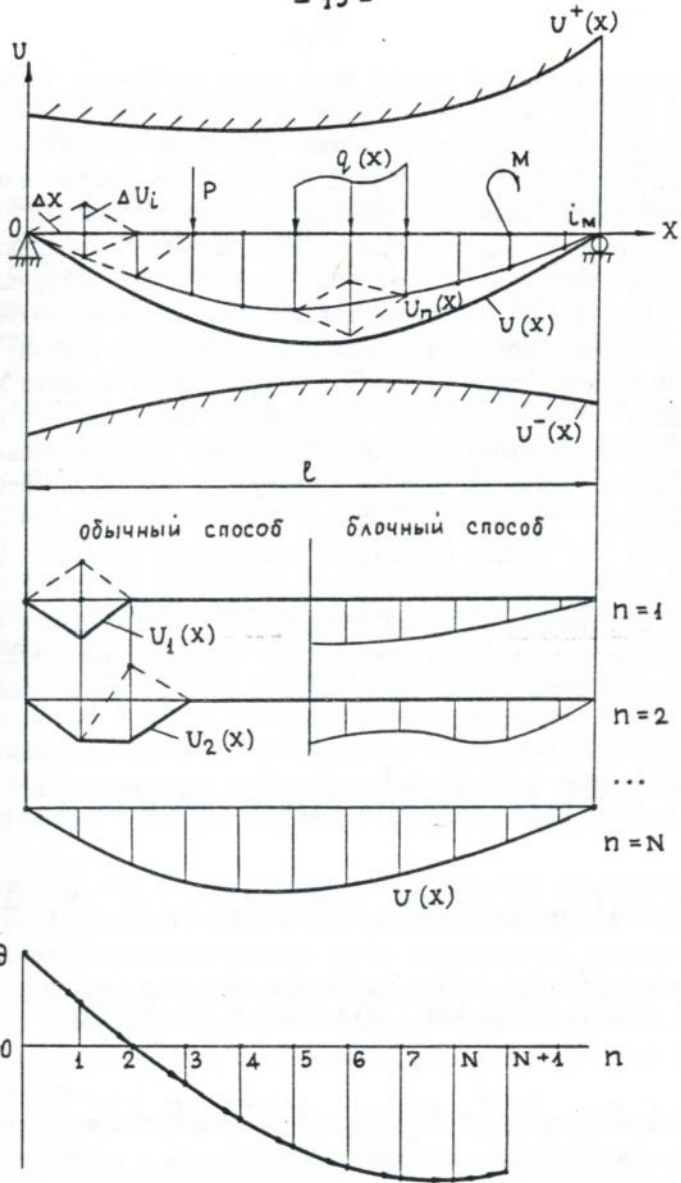


Рис. 3. Графическая интерпретация метода локальных вариаций.

уточнение расчетной модели шины путем увеличения числа определяемых функций неизбежно приводит к значительному увеличению расхода машинного времени. Возможно уточнение расчетной модели без увеличения числа неизвестных функций, что практически не увеличивает расход машинного времени. К таким уточнениям относятся: учет жесткости бортовых колец; учет жесткости массивных грунтозацепов; учет разномодульности резинокордного материала.

2.4. Частные случаи уравнений. Использование трехмерных уравнений теории упругости анизотропного тела для решения контактных задач слоистых анизотропных оболочек требует больших затрат машинного времени даже для современных ЭВМ. Поэтому применение трехмерных уравнений целесообразно для расчета весьма ответственных или очень сложных по конструкции шин. Кроме этих случаев, трехмерные уравнения используют для оценки точности упрощенных моделей на основе прикладных технических уравнений анизотропных слоистых оболочек.

Для прикладных задач целесообразно использовать математическую модель шины как однослойную анизотропную оболочку типа Тимошенко. Функционал полной энергии в этом случае имеет вид

$$\begin{aligned}
 \mathcal{E} = & \frac{1}{2} \int_F [B_{11} \varepsilon_{11}^2 + B_{66} \varepsilon_{12}^2 + B_{22} \varepsilon_{22}^2 + 2B_{12} \varepsilon_{11} \varepsilon_{22} + \\
 & + B_{16} (\varepsilon_{11} \chi_{12} + \varepsilon_{12} \chi_{11}) + B_{26} (\varepsilon_{22} \chi_{12} + \varepsilon_{12} \chi_{22}) + \\
 & + D_{11} \chi_{11}^2 + D_{66} \chi_{12}^2 + D_{22} \chi_{22}^2 + 2D_{12} \chi_{11} \chi_{22} + \\
 & + C_1 (\varphi_1 - \lambda_1)^2 + C_2 (\varphi_2 - \lambda_2)^2] dF + \mathcal{E}_p - \\
 & - q \int_F (U_1 \sin d_1 + U_2 \sin d_2 + U_3 \cos d_1 \cos d_2) dF - \\
 & - \sum_{e=1}^3 (Q_e U_e^* + M_e \beta_e^*)
 \end{aligned} \tag{5}$$

Возможно использование уравнений на основе гипотез Кирхгофа-Лява. Корректность решения контактной задачи при этом не нарушается, так как во всех указанных моделях имеется дополнительный слой между оболочкой шины и дорогой, который позволяет избежать особенностей в контактной зоне.

2.5. Примеры расчета. В качестве примера решена задача о нагружении оболочки крупногабаритной радиальной шины внутренним давлением. Шина диаметром 2 м имеет восемь слоев анидного каркаса и четыре слоя металлокордного брекера. Задача решена по двум моделям: трехмерные уравнения теории упругости и модели Тимошенко. На рис. 4а представлены перемещения оболочки шины: кривые 1,2 - прогибы внутренней и наружной поверхностей оболочки; кривые 3,4 - перемещения в меридиональном и окружном направлениях точек координатной поверхности; $h = 4.2$ см - толщина оболочки по экватору; - относительное расстояние от экватора к борту. Кривые 1-4 соответствуют решению по трехмерным уравнениям, кривая 5 - по модели Тимошенко.

На рис. 4б показаны усилия в нитях корда брекера (кривые 1-4) и усилия в нитях корда внутреннего и наружного слоев каркаса (ординаты кривых 5,6 увеличены в 10 раз для удобства анализа). Учет трехмерного напряженного состояния и анизотропии оболочки приводит к перераспределению усилий в слоях брекера и каркаса.

Известно, что в зоне краев брекера возможно расслоение пакета. Это подтверждается расчетным распределением нормальных и касательных напряжений, которые имеют максимальные ординаты на границе с первым слоем брекера. Максимальные деформации сжатия равны 9,1 %. Максимальные межслойные сдвиговые деформации равны 18 %, т. е. учет обжатия сопоставим с влиянием межслойных деформаций сдвига.

Результаты расчетов по приведенным моделям показали хорошее соответствие с аналогичными решениями, выполненными сотрудниками Э. И. Григолюка.

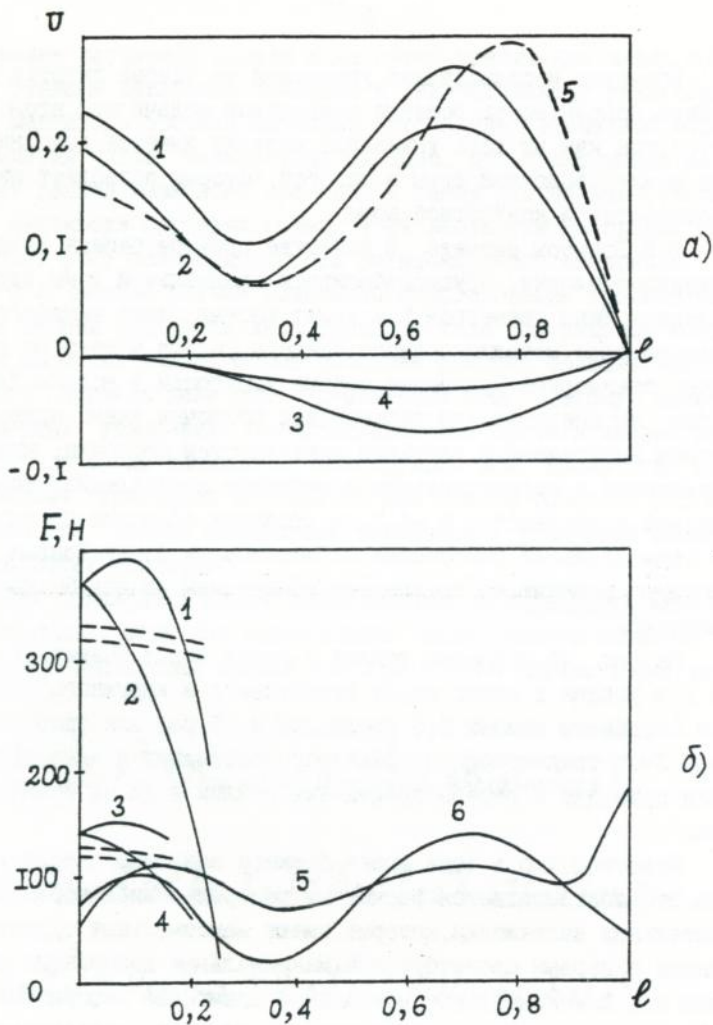


Рис. 4. Перемещения (а) и усилия в нитях корда (б) оболочки шины 2I.00P33. Прогибы внутренней (1а) и наружной (2а) поверхностей; перемещения в меридиональном (3а) и окружном (4а) направлениях. Усилия в нитях брекера (1б-4б) и каркаса (5б, 6б). - - - решение по модели Тимошенко.

Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБОЛОЧЕК ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН

Определяющий тенденцией развития и совершенствования пневматических шин является повышение их грузоподъемности и эксплуатационной надежности. В соответствии с этой задачей выполнены расчеты различных конструктивных вариантов КГ и СКГ шин.

Рассмотрим на примере шины 40.00-57 влияние различных конструктивных решений на напряженно-деформированное состояние оболочки шины.

Шина 40.00-57 является в настоящее время самой большой по габаритам (диаметр 3,6 м, ширина 1,1 м), массе (3,5 т), числу слоев (42 слоя анидного корда с прочностью одной нити 300 н). Номинальная вертикальная нагрузка равна 504 кН, внутреннее давление - 0,5 МПа. Максимальный ресурс равен 60 тыс. км при средней эксплуатационной скорости 18 км/ч. Стоимость одной шины составляет 900 тыс. рублей (в ценах 1992 г.), а общие эксплуатационные затраты на шины составляют 30-40 % транспортных расходов.

Из этого краткого описания конструктивных и эксплуатационных характеристик СКГ шин следует, что применение математического моделирования напряженно-деформированного состояния на стадии проектирования с целью повышения надежности и ресурса шин является важной научно-технической задачей.

3.1. Влияние числа слоев корда. Анализ условий эксплуатации шин 40.00-57 показал, что реальная нагрузка на шину составляет 600 кН, а средняя эксплуатационная скорость движения самосвала равна 20 км/ч. В результате этого значительно снизился ресурс шин. В связи с этим в НИИ крупногабаритных шин были проведены обширные научные и опытно-конструкторские работы по модернизации существующих и разработке новых СКГ шин.

Для модернизации выпускаемых шин в существующих пресс-формах число слоев оболочки увеличили с 42 до 52 при одновременном изменении внутреннего давления с 0,5 до 0,6 МПа. При этом, число слоев увеличивается за счет так называемых "узких" слоев, ширина которых приблизительно равна ширине зоны контакта шины. Эти "узкие" слои располагаются между первой, второй и третьей группами основных слоев, т.е. они усиливают бего-

вую часть шины в зоне возникновения значительных растягивающих усилий в оболочке при качении. Увеличение внутреннего давления на 20 % призвано увеличить жесткость шины и снизить растягивающие усилия в перегруженных внутренних слоях оболочки.

При разработке новых моделей шин были изменены диаметр и ширина шины, профиль поперечного сечения шины и ширина обода.

Для расчета различных вариантов шины 40.00-57 были приняты постоянными следующие основные параметры:

число слоев оболочки : 42 основных + 10 " уаких "
плотность нитей корда : 8,0- 8,4 нити/см
угол наклона нитей корда по экватору : 53 + 4
диаметр нити корда : 0,8 мм
модуль упругости корда : 1500 МПа
толщина оболочки по экватору : 60 мм
толщина протектора с подканавкой : 108 мм
модуль упругости резины протектора : 6,1 МПа

В табл. 1 представлены основные расчетные характеристики пяти вариантов шин: первый вариант является эталонным, имеет диаметр 3530 и ширину 1100 мм; второй вариант имеет диаметр 3600 и ширину 1110 мм; третий вариант по диаметру и ширине шины соответствует второму варианту и имеет обод шире стандартного на 50 мм.

Анализ результатов расчетов в сравнении с первым показывает: усилия в нитях корда по короне имеют разлия в пределах 3 %, а по стенке оболочки усилия в третьем варианте меньше на 15 %, что обусловлено более широким ободом;

межслойные касательные напряжения увеличились в окружном направлении на 12 - 20 % и снизились в меридиональном направлении на 22 % ;

напряжение в резине подканавки отличаются на 5 - 7 %;

деформации каркаса во 2 и 3 вариантах ниже на 3 - 6 % ;

контактные давления отличаются на 10 % ;

радиальные прогибы практически одинаковы ;

коэффициенты запаса прочности корда отличаются на 3 % ;

параметры контактной зоны близки к первому варианту.

Сравнение трех вариантов показывает, что увеличение ширины обода на 5 % улучшает напряженно-деформированное состояние шины на 10 - 15 %.

3. 2. Влияние модуля упругости корда. С этой целью выполнены

Основные расчетные характеристики шины 40.00-57

| Максимальные значения | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Усилия в нитях корда, Н : | | | | | |
| по короне | 30 | 31 | 29 | 23 | 36 |
| по стенке | 26 | 26 | 22 | 18 | 23 |
| Касательные напряжения в каркасе, кПа : | | | | | |
| окружное напр. | 710 | 860 | 800 | 670 | 720 |
| меридиональное напр. | 740 | 580 | 570 | 540 | 1220 |
| Деформации шины, % : | | | | | |
| окружное напр. | 7,5 | 7,3 | 7,0 | 7,2 | 9,1 |
| меридиональное напр. | 12,8 | 12,6 | 12,5 | 13,2 | 10,9 |
| Контактные давления, кПа : | | | | | |
| центр | 970 | 910 | 930 | 930 | 1030 |
| окружное напр. | 1040 | 1010 | 1030 | 730 | 670 |
| меридиональное напр. | 730 | 870 | 600 | 770 | 640 |
| среднее по контактной зоне | 542 | 512 | 502 | 548 | 551 |
| Радиальный прогиб, мм : | 149 | 151 | 150 | 162 | 158 |
| Радиальная нагрузка, кН | 620 | 620 | 620 | 620 | 620 |
| Параметры контактной зоны : | | | | | |
| площадь, см ² | 11481 | 12145 | 12364 | 11302 | 11251 |
| длина, см | 149 | 151 | 151 | 131 | 132 |
| ширина, см | 97,2 | 103 | 102 | 97,2 | 103 |
| Коэффициент запаса прочности | 10,0 | 9,68 | 10,3 | 12,5 | 8,34 |

расчеты шины - эталона с менее жестким кордом, модуль упругости которого равен 1000 МПа. Сравнение результатов графы 4 табл. 1 с графой 1 показывает:

снижение модуля упругости корда на 33 % приводит к уменьшению усилий в нитях корда на 25 - 30 % и увеличению напряжений в резине каркаса на 20 % ;

прогиб шины увеличивается на 10 % ;

происходит перераспределение контактных давлений и, как будет показано в главе 4, возрастание температур в угловой зоне.

3.3. Влияние разброса углов армирования.

Качество шин и, следовательно, их ходимость зависит от точности укладки нитей корда, т.е. от технологического разброса углов наклона нитей корда в каркасе. В 5 графе табл. 1 приведены основные расчетные характеристики варианта шины, у которой внутренняя группа слоев имеет угол наклона меньше средней на 5 , а наружная группа слоев имеет угол наклона больше на 2,5 .

Сравнение результатов :

усилия в нитях корда увеличились на 20 % ;

межслойные касательные напряжения увеличились почти в 2 раза;

напряжение в резине подканавки отличаются на 10 % ;

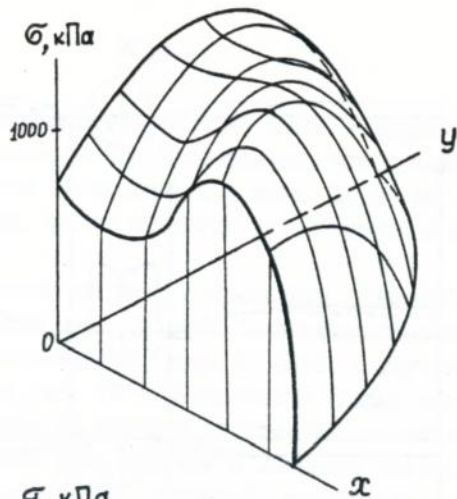
деформации в окружном направлении увеличились на 20 % ;

прогиб увеличился на 6 % .

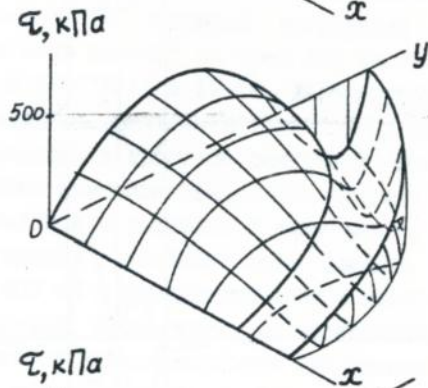
Анализ результатов технологического разброса показывает, что резко возросли межслойные касательные напряжения в меридиональном направлении. Это приводит к значительному увеличению температуры в угловой зоне и может вызвать расслоение каркаса.

Приведенные примеры показывают, что разработанный комплекс программ для решения контактной задачи позволяет на стадии проектирования оценить влияние различных конструктивных факторов и выбрать оптимальный вариант шины.

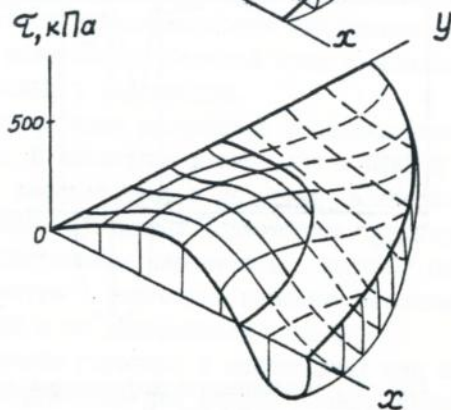
На рис. 5 представлено распределение нормальных и касательных контактных напряжений. На рис. 6 приведены графики изменения деформаций в оболочке шины за один оборот колеса. Эти графики позволяют оценить наиболее напряженные элементы оболочки и выбрать оптимальный вариант. В соответствии с проведенными расчетными исследованиями заводу - изготовителю были выданы рекомендации по усилению существующих и разработке новых моделей СКГ шин. Долевой экономический эффект автора составил 850 тыс. руб.



a)



б)



в)

Рис. 5. Контактные напряжения в шине 40.00-57: нормальные (а), меридиональные (б) и окружные (в).

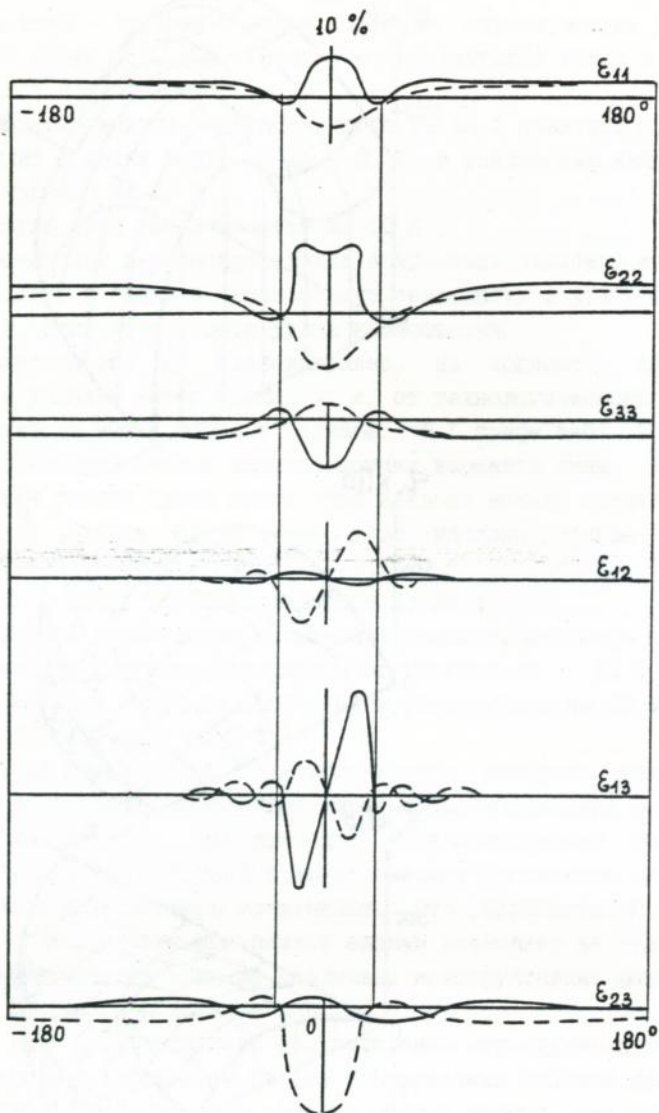


Рис. 6. Компоненты деформаций каркаса беговой зоны шины 40.00-57. Сплошные линии - по экватору, пунктирные - по краю беговой зоны.

3. 4. Потеря устойчивости оболочки шины. В результате анализа многочисленных расчетов шин установлено, что в зависимости от конструктивных решений пневматическая шина, несмотря на наличие внутреннего давления, может потерять устойчивость в контактной зоне.

В качестве примеров на рис. 7 приведены графики нагружения и разгрузки двух типов шин. На рис. 7а показан график перемещений беговой зоны диагональной шины ЗЗ.00-51 с внутренним давлением 500 кПа, а на рис. 7б - аналогичный график для радиальной металлокордной шины ЗЗ.00Р51 с внутренним давлением 650 кПа. График для диагональной шины получен в процессе последовательного непрерывного многократного процесса нагружения - разгрузки. График для радиальной шины состоит из трех фаз нагружения, которые обозначены цифрами 1-7, 8-11 и 12-16. Характерной особенностью этих графиков является наличие "петель" нагружения, которые обусловлены реаким выхлопом в процессе разгрузки. Очевидно эти петли связаны с явлением шумообразования при качении шин. Сравнение графиков диагональной и радиальной шины одного класса показывает явные преимущества радиальной шины: площадь петли для номинальной нагрузки 400 кН у радиальной шины в несколько раз меньше, чем у диагональной. Кроме того, на восходящей ветви у диагональной шины имеются неравномерности нагружения, что обусловлено перестроением поверхности беговой зоны и, следовательно, неравномерности напряжений и деформаций.

3. 5. Сравнение результатов расчетов с экспериментами и решениями других авторов. В последние десять лет в НИИКТШ проводились систематические лабораторные и натурные эксперименты по анализу НДС различных конструктивных моделей шин. В результате установлено, что по интегральным параметрам (прогибу, размерам контактной зоны, температуре) расчетные значения отличаются от экспериментальных на 10%, а по деформациям - до 20%.

Были выполнены расчеты грузовых и авиационных шин по моделям автора и моделям сотрудников НИИ шинной промышленности (Москва) И. К. Николаева и В. Н. Подопригоры, которые показали их соответствие по напряжениям и деформациям.

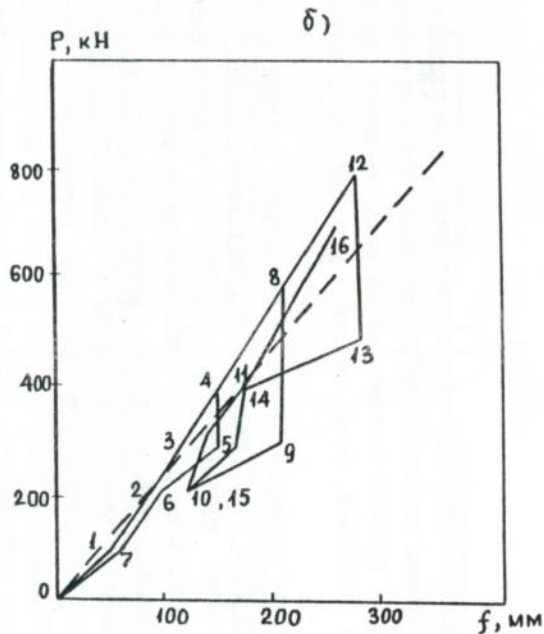
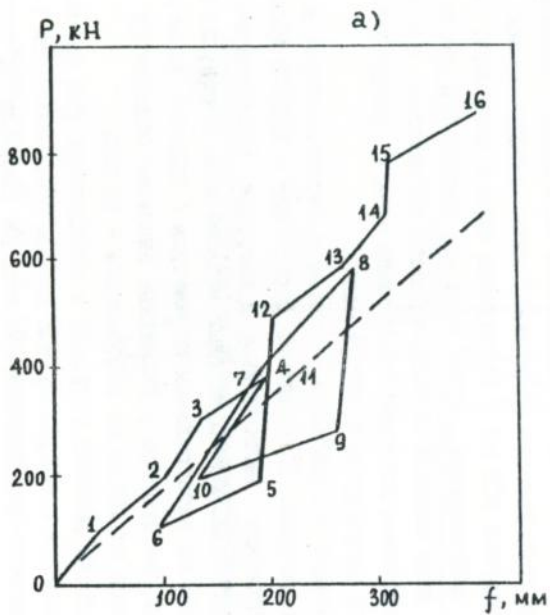


Рис. 7. Перемещение короны шины 33.00-5I диагональной (а) и радиальной (б) конструкции. Цифрами указан путь нагружения и разгрузки шины. Пунктирная линия соответствует безмоментной шине.

Глава 4. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ И КРИТИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ КАЧЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН

В последние годы в карьерах страны с различными климатическими и горно-геологическими условиями прошли проверку в режимах интенсивной эксплуатации различные модели отечественных и импортных крупно- и сверхкрупногабаритных шин. Анализ результатов опытно-промышленной эксплуатации КГШ показал, что основным критерием их работоспособности является величина температуры разогрева каркаса, подканавки и протектора, которая при нормативных режимах эксплуатации автосамосвалов достигает 110 - 130° С, что приводит к термодеструкции материала.

4.1 Температурные задачи пневматических шин.

В процессе качения циклические изменения напряженно-деформированного состояния элементов оболочки и гистерезисные свойства резины и корда обуславливают значительный нагрев шины. Для некоторых типов шин температура разогрева является не только фактором изменения напряженно-деформированного состояния (например, за счет повышения внутреннего давления), но и является критерием работоспособности и производительности.

В общем случае температурные поля шины являются трехмерными и нестационарными. Решение значительно упрощается для несвязанной термоупругой задачи. Кроме того принято, что температурное поле оболочки шины в окружном направлении является симметричным.

Уравнение теплопроводности в этом случае имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{q}{c\rho} \quad (6)$$

Внутренние источники тепла в уравнении (6) определяем с помощью вязкоупругих характеристик резин и кордов

$$q = \pi E'' \varepsilon^2 \nu$$

где E'' - модули потерь резинокордного композита оболочки шины; ν - частота цикла при качении шины.

Следовательно, для решения задачи о термонапряженном состоянии шины кроме модулей упругости необходимо определить модули потерь резины и корда. Затем, используя одну из теорий армирования, можно рассчитать модули упругости и потерь для композиционного резинокордного материала оболочки. Задача осложняется тем, что режим нагружения шины не является гармоническим (рис. 6). В рамках линейной теории вязкоупругости можно решить эту задачу, используя принцип суперпозиции Больцмана, путем разложения произвольного циклического нагружения в ряды Фурье.

Возможен другой путь: воспроизведение "шинных" режимов нагружения на специальных испытательных машинах. Совместно с физической лабораторией НИИ шинной промышленности были проведены исследования резин, которые используются для крупно- и сверхкрупногабаритных шин. В программе испытаний были использованы результаты расчетов НДС по математическим моделям автора настоящей работы. Модули упругости и потерь основных типов резин были получены при нормальной и эксплуатационной температурах.

Вязкоупругие свойства кордов изучены в меньшей степени, чем свойства резин. Однако их вклад в тепловыделения при качении шин составляет ориентировочно 20 - 25%. Это обусловлено как значительной долей, которую они занимают в объеме шины (порядка 30%), так и их физико-механической структурой взаимодействия с резиновой матрицей.

4.2 Расчет и анализ температурных полей шин.

В виду большой сложности решения задачи динамической термоупругости для слоистой анизотропной тороидальной оболочки приняты допущения о не связанности термоупругой задачи и симметричности в окружном направлении температурных полей. Для численного решения используется метод последовательных приближений, т.е. метод упругих решений.

В первом приближении решаем упругую задачу и определяем поля перемещений и деформаций. Учитывая вязкоупругие свойства резины и корда с помощью уравнений теплопроводности рассчитываем температурные поля. Зная температурные поля шины, уточняем упругие характеристики резин и кордов, и вновь решаем упругую задачу с новыми характеристиками материалов. По уточненным полям перемещений и деформаций и новым вязкоупругим параметрам материалов находим уточненные температурные поля. Обычно достаточно второго приближения для решения термоупругой задачи.

Максимальные температуры в оболочке шины возникают на границе каркас - протектор (рис. 8). В зависимости от конструктивных решений максимальные температуры по ширине беговой зоны шины могут смещаться от центра к углу. Важно, чтобы перепад температур по ширине беговой зоны не превосходил 10%, а максимальная температура - 110°C. Одним из конструктивных способов оптимизации температурных полей является использование окружных выемок в резине протектора. Были выполнены расчеты термонапряженного состояния шины 40.00-57 в зависимости от расположения выемки глубиной 30 и шириной 60мм. Оптимальным решением является расположение окружной выемки на расстоянии 140 мм от центра. Максимальная температура снизилась на 10%.

Определив температурные поля, можно установить эксплуатационную производительность шины, которая равна произведению средней за транспортный цикл нагрузки на шину на среднюю эксплуатационную скорость. Эта величина является важнейшей характеристикой СКГ шин. Она зависит не только от оптимальности конструктивных решений, принятых для данной шины, но в такой же степени от теплостойкости резин и кордов. Эксперименты показывают, что для большинства шинных резин и кордов предельная допустимая температура, при которой сохраняются их прочностные и жесткостные свойства, равна 110°C. Повышение допустимой температуры на 10 % приводит к повышению эксплуатационной производительности на 20 % .

С помощью комплекса программ в НИИКГШ на стадии проектирования новых шин прогнозируют величину производительности. В качестве примера рассчитаны температурные поля и производительность для четырех вариантов шины 40.00-57 в соответствии с данными табл. 1.

Расчетная производительность для трех вариантов составляет:

1 вариант - 880 - 1100 ткм/час

2 вариант - 940 - 1150 ткм/час

3 вариант - 970 - 1230 ткм/час

Меньшие значения соответствуют допустимой температуре 110°C, большие - 120°C.

Четвертый вариант соответствует первому, но модуль упругости корда меньше в этом случае на 30 % . Анализ результатов показывает, что происходит качественное и количественное перераспределение температурных полей. Максимальные температуры возникают

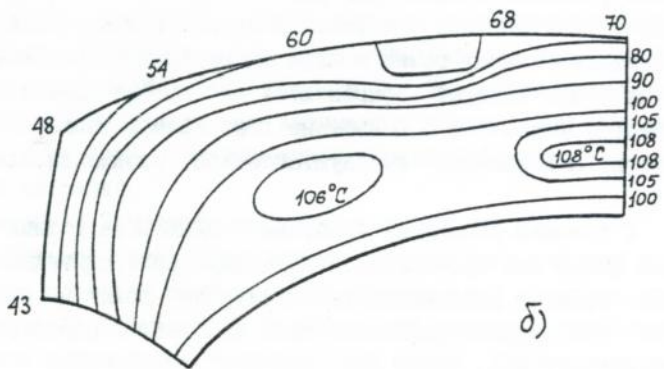
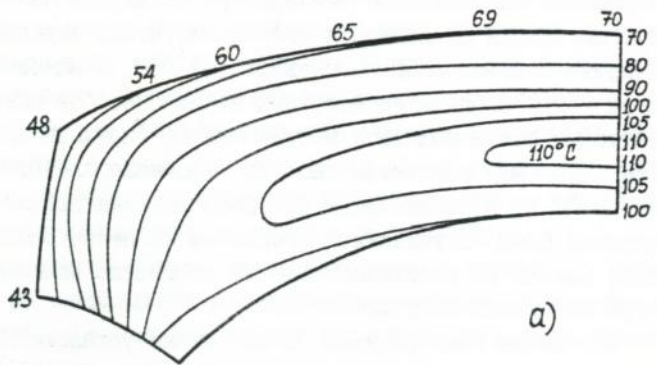


Рис. 8. Температурные поля в контактной зоне шины 40.00-57 с обычным протектором (а) и при наличии окружной выемки (б).

в угловой зоне. Величина производительности снижается на 16 - 18 % .

При наличии технологического разброса углов наклона корда величина производительности составит 480 - 530 ткм/час , т. е. снизится в 1,5 - 2 раза.

Результаты расчетов соответствуют данным, полученным в условиях реальной эксплуатации с точностью до 10%.

Приведенные аналитические решения дают основание для использования изложенного выше метода решения термоупругой задачи при разработке новых и модернизации существующих моделей шин.

4.3 Расчет силы сопротивления качению шин.

Одним из основных требований при создании новых шин является снижение силы сопротивления качению, чтобы обеспечить снижение расхода топлива. В обзорной статье сотрудников НИИ шинной промышленности А. М. Пичугина и А. Г. Шварца показано, что гистерезисные потери составляют 90-95% от общего сопротивления качению шин. Используя физическую природу силы сопротивления качению как эквивалент рассеянной энергии, запишем формулу для ее расчета

$$P = 0,5 \cdot E'' \cdot \varepsilon^2 V / R \quad (8)$$

где V - объём элемента оболочки.

Анализ влияния различных факторов на силу сопротивления качению показывает, что основной вклад в потери энергии на качение шины вносит беговая зона шины (80 %), на боковину приходится около 20%.

В случае снижения на 30 % модуля упругости корда сила сопротивления качению возрастает на 20 % .

Сила сопротивления качению шины при дополнительном воздействии боковых и тормозных сил и крутящего момента возрастает приблизительно на 17 % .

Глава 5. КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОБОЛОЧКИ ШИНЫ С УПРУГИМ ОСНОВАНИЕМ

Конструктивные особенности пневматических шин для сельскохозяйственной техники связаны с эксплуатацией их на мягких грунтах и необходимостью обеспечения агротехнических требований. В связи с этим на стадии проектирования нужно оценить НДС оболочки шины и грунта и выбрать оптимальный вариант. Теоретическим и экспериментальным исследованиям взаимодействия шины с упругим основанием посвящены работы Б. Л. Бухина, В. И. Кнороза, В. П. Бойкова, В. Н. Белковского и др.

5.1 Функционал энергии системы шина-грунт. Шина радиальной конструкции моделируется трехслойной анизотропной оболочкой в соответствии с гипотезой "ломаной" линии, с учетом формы грунтозацепов. Грунт описывается гипотезой Винклера. Для решения задачи используется полная энергия системы шина-грунт

$$\begin{aligned} \mathcal{J} = & \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 \int_{V_k} (\sigma_{11}^k \varepsilon_{11}^k + \sigma_{12}^k \varepsilon_{12}^k + \sigma_{22}^k \varepsilon_{22}^k + \\ & + \sigma_{13}^k \varepsilon_{13}^k + \sigma_{23}^k \varepsilon_{23}^k + \sigma_{33}^k \varepsilon_{33}^k) dV_k + \mathcal{J}_p + \\ & + \mathcal{J}_g + q_g \Delta V - \sum_{\ell=1}^3 (Q_{\ell} V_{\ell}^* + M_{\ell} \beta_{\ell}^*) . \end{aligned} \quad (9)$$

В функционале (9) учтена энергия деформации грунта

$$\mathcal{J}_g = \frac{1}{2} \int_{V_g} E_g (\varepsilon_{1g}^2 + \varepsilon_{3g}^2) dV_g \quad (10)$$

Деформации грунта определялись в соответствии с принятыми гипотезами так

$$\varepsilon_{1g} = U_{1g} / b_g ; \quad \varepsilon_{3g} = U_{3g} / h_g ; \quad (11)$$

где b - расстояние между грунтозацепами; h_g - толщина грунта.

Шина для сельскохозяйственной техники должна удовлетворять заданным агротехническим требованиям, одним из которых является окружная тягово-сцепная сила. На влажных грунтах окружная сила передается в основном через мощные дискретно расположенные грунтозацепы. Величина этой силы определяется через напряжения в уплом основании по формуле

$$Q_1 = \sigma_x F_p \cos \alpha \quad (12)$$

где α - угол наклона грунтозацепа к оси колеса; F_p - площадь боковой поверхности грунтозацепов, которая контактирует с грунтом.

Вычислив площадь контакта оболочки шины с грунтом и величину окружной силы в зависимости от подводимой мощности и заданной скорости качения, проверяем на прочность грунт по условию среза.

Оболочка шины для сельскохозяйственной техники в силу низкого внутреннего давления имеет малое число слоев, каркас легко изгибается на неровностях грунта и, следовательно, можно пренебречь деформациями растяжения корда. В этом случае, для устойчивости решения задачи в функционале (9) учтена работа давления воздуха через изменение объема внутренней полости оболочки.

5.2. Влияние модуля упругости грунта. В соответствии с изложенным выполнены расчеты шины 15,5Р38. Анализ результатов показал, что при изменении модуля упругости грунта в диапазоне от 1 до 80МПа основные параметры НДС шины увеличиваются так (табл. 2):

- усилия в нитях корда каркаса и брекера в 1,5-1,7 раза;
- касательные межслойные напряжения в 2,2 раза;
- напряжение в резине подканавки в 1,2 раза;
- деформации каркаса и брекера в 1,4 раза;
- контактные давления в 3,3 раза;
- прогиб шины в 2,75 раза.

Отношение полного прогиба шины с учетом погружения в грунт к величине осадки грунта при его модуле упругости 1 МПа равно 1,5.

5.3. Влияние крутящего момента. Рассмотрен случай приложения крутящего момента к шине в зависимости от подводимой мощности и скорости качения. Установлено, что при изменении мощности в диапазоне (7,4-44,2) кВт, постоянной скорости качения 30 км/ч и коэффициенте трения между резиной и грунтом равном 0,7 окружная сила, приходящаяся на грунтозацепы, по отношению к общей окружной силе увеличивается от 30% до 60%. Уменьшение коэффициента трения для влажных грунтов до 0,1 приводит к увеличению окружной силы, приходящейся на грунтозацепы, до 90%. При этом, микроскольжение в пятне контакта шины с грунтом равно 98%. Кроме того, при увеличении крутящего момента происходит уменьшение полного прогиба шины на 20%.

5.4 Расчет силы сопротивления качению шины с учетом грунта.

Одним из основных требований при создании новых шин является снижение силы сопротивления качению, чтобы обеспечить сокращение расхода топлива.

В четвертой главе представлена методика расчета силы сопротивления качению шины с учетом вязкоупругих свойств резинокордного материала.

Грунт также является вязкоупругим материалом, поэтому в настоящей работе предлагается распространить указанный подход для расчета силы сопротивления качению шины с учетом свойств грунта.

Коэффициент сопротивления качению при изменении модуля упругости грунта от 125 кПа до 2000 кПа уменьшается в 3,2 раза (для давления 90 кПа) и в 10,3 раза (для давления 180 кПа).

Вклад каркаса изменяется: от 20,8% до 56,6% для $q=90$ кПа;
от 3,21% до 31,5% для $q=180$ кПа.

Вклад грунта изменяется : от 78,3% до 2,4% для $q=90$ кПа;
от 96,0 до 64,0 % для $q=180$ кПа.

Принятый подход определения силы сопротивления качению не учитывает всех особенностей грунта, но позволяет на стадии разработки проекта шины оценить вклад отдельных конструктивных элементов или рецептурных изменений, а также режимов нагружения на величину силы сопротивления качению.

Таблица 2

Основные расчетные характеристики шины 15.5P38

| Усилия и деформации | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|------|------|------|------|------|
| Усилия в нитях корда, Н: | | | | | |
| по короне | 15 | 15 | 15 | 15 | 17 |
| по стенке | 10 | 12 | 12 | 12 | 13 |
| Касательные напряжения в каркасе, кПа : | | | | | |
| окружное напр. | 110 | 110 | 170 | 270 | 250 |
| меридиональное напр. | 170 | 180 | 180 | 150 | 190 |
| Деформации каркаса, % : | | | | | |
| окружное напр. | 3,2 | 3,5 | 4,0 | 4,2 | 4,6 |
| меридиональное напр. | 3,4 | 3,4 | 3,7 | 4,0 | 4,4 |
| Контактные давления, кПа: | | | | | |
| центр | 310 | 300 | 630 | 830 | 990 |
| окружное напр. | 90 | 80 | 610 | 990 | 1020 |
| меридиональное напр. | 210 | 220 | 360 | 290 | 220 |
| среднее давление | 120 | 120 | 269 | 554 | 642 |
| Радиальный прогиб, мм : | | | | | |
| шины | 93,3 | 93,5 | 70,4 | 57,5 | 54,6 |
| грунта | 62,0 | 61,0 | 32,0 | 10,0 | 2,0 |
| Радиальная нагрузка, кН | 20,6 | 20,6 | 20,6 | 20,6 | 20,6 |
| Параметры контактной зоны: | | | | | |
| длина, см | 66,4 | 66,4 | 44,8 | 26,9 | 26,9 |
| ширина, см | 32,6 | 32,6 | 22,4 | 18,1 | 16,3 |
| горизонт. площадь, см ² | 1706 | 1705 | 766 | 372 | 322 |
| вертикаль. площадь, см ² | 534 | 530 | 305 | 80 | 16 |
| коэффициент трения | 0,7 | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 0,7 |
| Микроскольжение, % : | | | | | |
| окружное напр. | 63 | 90 | 75 | 12 | 5 |
| меридиональное напр. | 68 | 89 | 79 | 26 | 14 |
| Модуль упругости грунта, МПа : | 1 | 1 | 4 | 16 | 80 |

Глава 6. ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ШИН

В процессе эксплуатации шин происходит износ протектора, старение материалов, появление и разрастание микротрещин. В некоторых случаях, когда состояние дорожной поверхности является неудовлетворительным, возникают порезы протектора с внедрением в них твердых элементов породы, пробои каркаса. В связи с этим возникает необходимость восстановительного ремонта шин, что позволяет увеличить общий ресурс шин. В настоящее время отношение послеремонтного ресурса крупногабаритных шин к доремонтному составляет 0,6. Дальнейшее увеличение ресурса восстановленных шин связано как с улучшением технологии ремонта, так и с методами математического прогнозирования НДС оболочки шины в зависимости от вида повреждения. С позиций механики все шины с повреждениями можно условно классифицировать так:

- 1) шины с равномерно изношенным протектором и мелкими порезами верхних слоев корда ;
- 2) шины со сквозным повреждением оболочки.

6.1. Расчет шины с равномерно изношенным протектором.

Шина с равномерно изношенным протектором является идеальным объектом для повторного использования после восстановительного ремонта. Напряженно-деформированное состояние такой шины наилучшим образом описывается изложенными выше уравнениями.

Решение задачи будем выполнять в предположении отсутствия каких-либо повреждений каркаса, но с уменьшенным значением модуля упругости. Как показали экспериментальные замеры, модуль упругости корда восстановленной шины ниже на 30%, чем новой. Это обусловлено двумя факторами: 1) усталостью материала при эксплуатации шины; 2) изменением свойств корда при вулканизации в процессе восстановительного ремонта.

Сравнение результатов расчета шины ЗЗ.00-51 показывает, что деформации и напряжения увеличились на 20-30 %. Это снижение прочности следует компенсировать дополнительными конструктивными решениями (например, введением силового брекерного пояса).

6.2. Расчет шины при наличии сквозных повреждений .

Наличие в шине локальных включений, обусловленных сквоз-

ным повреждением каркаса значительно усложняет задачу определения напряжений и деформаций, особенно в зоне включения. В этом случае необходимо использовать уравнения трехмерной теории упругости анизотропного тела. Применение прикладных теорий анизотропных оболочек возможно при следующих дополнительных гипотезах: 1) границы включения совпадают с координатной сеткой; 2) особенности в угловых точках включений не учитываются; 3) размеры включения значительно больше толщины каркаса. Эти гипотезы не вносят большой погрешности при расчетах радиальной жесткости шины, а концентрация напряжений в угловых точках включения может быть учтена после определения основного напряженного состояния.

Результаты обследований крупногабаритных шин, вышедших из эксплуатации в связи со сквозным повреждением каркаса, показывают, что они имеют место в основном по беговой части шины. Максимальные размеры сквозных повреждений шины 33.00-51 после их обработки для ремонта составляли 0,25м в окружном и 0,15м в меридиональном направлениях. При повреждениях больших размеров шины отбраковывались.

Задачи механики таких шин заключались в определении напряженно-деформированного состояния в зависимости от размера и числа повреждений беговой зоны. В комплексе программ предусмотрен учет этих особенностей, т.е. учет взаимного влияния включений.

На втором этапе расчета при нагружении шины внутренним давлением и радиальной нагрузкой включение было расположено в центре пятна контакта, затем на границе пятна контакта и за пределами на расстоянии длины контакта. Анализ этих результатов показывает значительное влияние включения на перераспределение контактных давлений.

Полученные результаты используются для оценки ремонтпригодности крупногабаритных шин. В частности, для шины 33.00-51 число включений указанного выше размера не должно превышать по беговой зоне трех.

Глава 7. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ АНИЗОТРОПНЫХ ОБОЛОЧЕК ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН

Оптимальное проектирование любого технического объекта в настоящее время является общепринятой нормой. Особенно это актуально для таких изделий, которые выпускаются десятками и сотнями миллионов штук.

В НИИ крупногабаритных шин в последние годы ведутся работы по созданию системы автоматизированного проектирования шин-САПР-ШИНА. Основу системы составляет комплекс программ расчета напряженно-деформированного состояния и температурных полей пневматических шин различного назначения. Комплекс программ состоит из нескольких десятков модулей и позволяет решать следующие задачи:

1. Выбор оптимального профиля оболочки шины и расчет необходимого числа слоев корда .
2. Расчет напряженно-деформированного состояния шины при действии различных эксплуатационных нагрузок, т. е. решение контактной задачи.
3. Расчеты температурных полей в шине в зависимости от действующих нагрузок и скоростей качения.
4. Расчеты силы сопротивления качению.
5. Определение тягово-сцепных свойств оболочки шины, взаимодействующих с грунтом.
6. Расчеты напряженно-деформированного состояния восстановленных шин.
7. Прогнозирование ресурса шин.

Все указанные выше задачи решаются на основе математической модели пневматической шины как слоистой анизотропной тороидальной оболочки, изложенной в предыдущих главах настоящей работы.

Конечной целью системы автоматизированного проектирования является создание конструкции минимального веса и стоимости при заданном ресурсе.

Ресурс пневматической шины - это пробег шины (в км или часах) до наступления предельного состояния, требующего прекращения ее эксплуатации.

Ресурс шины - величина случайная, зависящая от качества ее

изготовления и условий эксплуатации. В связи с наличием нескольких предельных состояний следует оперировать понятием условного ресурса шины, определяемого одним из предельных состояний.

Практика эксплуатации крупногабаритных шин, работающих в экстремальных условиях, показала, что основная часть отказов приходится на усталостное разрушение межслойных резин.

В настоящее время в механике разрушения твердых тел существует большое количество подходов и критериев разрушения, на основе которых может быть рассмотрен вопрос о долговечности различных материалов и объектов.

Наиболее подходящим для определения долговечности резино-кордных оболочек являются критерии по максимуму энергии разрушения и развивающейся поврежденности.

В соответствии с изложенным предлагается такая методика расчета ресурса шины по критерию разрушения резины:

1. Рассчитываются поля напряжений в шине при действии эксплуатационной нагрузки - рассматривается действие на шину внутреннего давления и местной радиальной нагрузки, соответствующей основному режиму эксплуатации шины.

2. Определяются реологические параметры шины. Для этого используются соотношения линейной теории вязкоупругости для резины и корда.

3. Рассчитываются поля температур от диссипативного саморазогрева с помощью уравнения теплопроводности.

4. Для определения долговечности используются два критерия разрушения:

а) критерий по развивающейся в процессе циклического нагружения резины допустимой поврежденности

$$t = t_0 \exp[U_0 - \gamma(\sigma_d, \sigma_c, t)(\sigma_d + d_c \sigma_c)] / kT; \quad (13)$$

где: t, U, γ - постоянные, зависящие от свойств резины; σ_d - амплитуда цикла напряжений; σ_c - среднее напряжение; d_c - коэффициент, определяемый опытным путем; k - постоянная Больцмана; T - температура;

б) энергетический критерий диссипативного типа по допустимой энергии разрушения

$$t = \Delta U_p \left[\lambda_p \nabla^2 \theta + U_0 \sum_{n=1}^{\infty} n \omega (\alpha_n^2 + \beta_n^2) E_n'' / E \right]^{-1} \quad (14)$$

где : α_n, β_n - коэффициенты разложения компонент деформаций в ряды Фурье. Остальные параметры соответствуют обозначениям, используемых в предыдущих главах.

Определим ресурс шины 40.00-57 по критерию разрушения межслойных резин на границе каркас - протектор.

1. Расчет ресурса шины на основе критерия разрушения по величине развивающейся поврежденности

Расчеты были выполнены для шины с внутренним давлением равным 600 кПа, $V = 15$ км/час, $T = 110^\circ\text{C}$ ($T = 383^\circ\text{K}$).

В качестве наиболее напряженных были рассмотрены две зоны: 1 - угловая зона и 2 - зона по короне. Для зоны 1 ресурс равен 42440 км., а для зоны 2 - 48920 км. Итак, ресурс шины по разрушению межслойных резин составляет 42440 км.

2. Определим ресурс шины 40.00-57 в соответствии с энергетическим критерием диссипативного типа, в первом приближении, т. е. при гармоническом характере нагружения.

В связи с отсутствием экспериментальных значений плотности энергии разрушения для шинных резин примем ее величину равной

$$\Delta U_p = 0,5 \cdot 10^{12} \text{ Дж/м}^3.$$

Расчеты выполним для наиболее напряженной зоны 2 по короне шины в центре пятна контакта: ресурс равен 58650 км.

Этот результат находится в удовлетворительном соответствии со значением ресурса 42440 км, полученным на основе критерия разрушения по величине развивающейся поврежденности.

Реализация разработанных математических моделей расчета ресурса шин на стадии проектирования будет способствовать повышению эксплуатационных качеств шин и созданию более рациональных конструкций шин, что имеет важное народнохозяйственное значение.

Заключение

1. Сформулированы и решены контактные задачи для анизотропных слоистых оболочек пневматических шин, взаимодействующих с дорожным покрытием. Контактная задача решена с учетом односторонних связей оболочки с дорожным покрытием, т.е. возможен отрыв элементов оболочки внутри контактной зоны от поверхности дороги. Дорожное покрытие может быть произвольного вида по геометрии, что позволяет моделировать различные режимы нагружения оболочки шины. Поверхность дороги может быть абсолютно гладкой или иметь реальный коэффициент трения, т.е. учитываются все три компонента напряжений в контактной зоне и, в том числе, возможность локального микроскольжения элементов оболочки.

2. Получены нелинейные уравнения анизотропных слоистых оболочек неоднородного строения по толщине на основе трехмерных уравнений теории упругости анизотропного тела. Уравнения представлены в виде функционала полной энергии оболочки. Слои оболочки могут иметь произвольные физические свойства. В пределах каждого слоя перемещения изменяются по линейному закону. Учитывается обжатие слоев.

3. Выполнены преобразования уравнений общего типа к прикладным уравнениям для случая оболочек регулярного строения по толщине и неоднородного строения по толщине меридионального сечения. Для оболочек однородного строения функционал полной энергии соответствует уравнениям типа Тимошенко, а для оболочек неоднородного строения использован функционал трехслойной оболочки с жесткими наружными слоями.

4. Минимизация функционала полной энергии осуществлялась численным методом локальных вариаций, для которого не требуется составления громоздкой матрицы нелинейных алгебраических уравнений и не имеет принципиального значения тип нелинейности. Число неизвестных в прикладных уравнениях для принятой в расчетах сеточной области 35×35 составляло около семи тысяч. Для увеличения скорости счета был разработан модифицированный метод локальных вариаций блочного типа.

5. Разработана прикладная методика расчета температурных полей при стационарном качении шины, которая учитывает вязкоупругие свойства резины и корда при импульсном характере нагружения.

Это позволило установить зависимость температурных полей от: числа слоев и модулей упругости корда; профиля поперечного сечения оболочки шины; величины внутреннего давления и радиальной, боковой, тормозной и моментных нагрузок; скорости качения. Зная температурные поля и свойства резины и корда при этих температурах, определена величина производительности шины и, следовательно, автомобиля.

6. Сформулирована и решена задача о контакте анизотропной оболочки с упругим основанием (грунтом), что позволило установить зависимость напряженно-деформированного состояния от величины крутящего момента и упругих свойств грунта.

7. Разработана прикладная методика расчета силы сопротивления качению, учитывающая физические и конструктивные свойства оболочки шины. Установлено, какой вклад вносит каждый элемент оболочки в величину силы сопротивления качению, в том числе, учтено влияние жесткости упругого основания (грунта).

8. Решены прикладные задачи механики восстановленных шин с целью определения ремонтпригодности и послеремонтного напряженно-деформированного состояния. С помощью анализа напряженно-деформированного состояния восстановленных шин найдены предельные размеры и число повреждений в оболочке сверхкрупногабаритной шины.

9. Разработана методика расчета ресурса пневматических шин, которая учитывает термонапряженное состояние всех элементов оболочки и свойства резинокордного материала.

10. С целью проверки основных теоретических положений работы проведен обширный вычислительный эксперимент по расчету напряженно-деформированного состояния и температурных полей различных типов шин: от шин для сельскохозяйственной техники до крупно- и сверхкрупногабаритных шин карьерных самосвалов. Выполнено сравнение с экспериментальными исследованиями других авторов.

11. Все исследования выполнялись по программам, разработанным лично автором на языке Фортран применительно к персональным ЭВМ. Комплекс программ объединяет свыше 50 подпрограмм в несколько блоков в зависимости от типа задач.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО

В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Прусаков А. П., Растеряев Ю. К., Кваша Э. Н., Михайлов В. Г. Расчет ортотропной тороидальной оболочки типа шины диагонального строения на локальную нагрузку // IX Всесоюзная конференция по теории оболочек и пластин. Аннотации докладов. - Ленинград, 1973. - С. 61 - 62.
2. Кваша Э. Н., Тищенко А. В. К вопросу об оптимизации динамических характеристик гибких анизотропных пластин и оболочек // Воздействие динамических нагрузок на элементы конструкций. Тезисы докладов конференции. - Харьков, 1974. - С. 27 - 28.
3. Казакевич М. И., Кваша Э. Н., Редько С. А. Влияние начальных условий на характер установившихся колебаний систем с нелинейной восстанавливающей силой // Математическая физика: Сборник научных трудов, вып. 15. - Киев: Наукова думка, 1974. - С. 59 - 62.
4. Прусаков А. П., Растеряев Ю. К., Кваша Э. Н., Михайлов В. Г. Расчет ортотропной тороидальной оболочки типа шины диагонального строения на локальные нагрузки // Контактная прочность пространственных конструкций: Сборник научных трудов. - Киев: Наукова думка, 1976. - С. 40 - 55.
5. Кваша Э. Н., Прусаков А. П. Некоторые контактные задачи слоистых тороидальных оболочек // Статика сооружений: Сборник научных статей. - Киев, Изд-во КИСИ, 1978. - С. 127 - 129.
6. Кваша Э. Н. Контакт тороидальной оболочки с абсолютно твердым телом // VII Всесоюзная конференция по прочности и пластичности: Тезисы докладов. - Горький, 1978. - С. 66 - 67.
7. Растеряев Ю. К., Кваша Э. Н., Прусаков А. П. Расчет крупногабаритной шины диагонального строения на действие внутреннего давления и местные эксплуатационные нагрузки // Международная конференция по каучуку и резине. - Киев, 1978. - Препринт ВЭО.
8. Растеряев Ю. К., Ищенко В. А., Прусаков А. П., Кваша Э. Н. Уточненный метод расчета крупногабаритных автомобильных шин // Всесоюзная научно-техническая конференция по методам расчета изделий из высокоэластичных материалов: Тезисы докладов. - Рига, 1980. - С. 76 - 77.
9. Кваша Э. Н. Контактная задача для опоясанной тороидальной оболочки // Расчет напряженно-деформированного состояния

пластин и оболочек. - Саратов: Изд-во СГУ, 1981. - С.10 - 12.

10. Ищенко В. А., Кваша Э. Н., Прусаков А. П., Растеряев Ю. К. Контактные задачи резинокордных оболочек вращения // Смешанные задачи механики деформированного тела: Тезисы докладов II -ой Всесоюзной конференции. - Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1981. - С.107 - 108.

11. Индейкин Б. А., Ищенко В. А., Кваша Э. Н., Никитина Л. Б. Термоупругое напряженное состояние и потери качения пневматических шин // Крупногабаритные шины для карьерных автосамосвалов и сельскохозяйственной техники. - М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1984. - С.14 - 24.

12. Кваша Э. Н., Плеханов А. В., Прусаков А. П. Неклассический вариант моментной теории пневматических шин // Международная конференция по каучуку и резине. - М.: 1984. - Препринт В50.

13. Индейкин Б. А., Ищенко В. А., Кваша Э. Н., Никитина Л. Б. Термоупругое состояние и потери качения пневматических шин // Там же. - М.: 1984. - Препринт В17.

14. Кваша Э. Н. Трехмерная контактная задача о нагружении анизотропной оболочки жестким штампом // Смешанные задачи механики деформируемого тела. Тезисы докладов III -ей Всесоюзной конференции. - Харьков: 1985. - С.100 - 101.

15. Кваша Э. Н., Скорняков Э. С. Некоторые вопросы механики восстановленных крупногабаритных шин // Каучук и резина -1985. - N 12. - С.21 - 23.

16. Индейкин Б. А., Ищенко В. А., Кваша Э. Н., Никитина Л. Б. Термонапряженное состояние пневматических шин // Каучук и резина - 1986. - N4. - С.30 - 33.

17. Индейкин Б. А., Ищенко В. А., Кваша Э. Н., Никитина Л. Б. Влияние конструктивных параметров на термонапряженное состояние сверхкрупногабаритных шин // Научные исследования в области производства крупногабаритных шин: Сборник научных трудов. - М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1986. - С.6 - 16.

18. Индейкин Б. А., Ищенко В. А., Кваша Э. Н., Никитина Л. Б. Влияние конструктивных параметров и режимов эксплуатации на потери качения сверхкрупногабаритных шин // Повышение технического уровня производства крупногабаритных шин: Сборник научных трудов. - М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1988. - С.6 - 15.

19. Кваша Э. Н. Контакт пневматической шины с упругим основанием // Проблемы шин и резинокордных композитов: Сборник на-

учных трудов. - М.: Изд-во НИИШП, 1989. - С. 72 - 79.

20. Кваша Э. Н., Никитина Л. Б. Теоретический анализ напряженно-деформированного и теплового состояний сверхкрупногабаритных шин для построения режимов стендовых испытаний, эквивалентных эксплуатационным // Там же. - С. 43 - 49.

21. Кваша Э. Н. Расчет линейных и угловых параметров жесткости шины при обжати на цилиндрическую поверхность // Научные основы и пути создания шин и технологии их производства уровня 2000 года: Материалы научно-технической конференции. Часть I. - М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1989. - С. 60 - 66.

22. Индейкин Б. А., Ищенко В. А., Кваша Э. Н., Никитина Л. Б. Влияние конструктивных параметров и режимов эксплуатации на потери качения сверхкрупногабаритных шин // Там же. - С. 102 - 111.

23. Кваша Э. Н., Константинов В. В. Влияние конструктивных параметров на прочность пневматической шины // Прочность, жесткость и технологичность изделий из композиционных материалов: Тезисы докладов III -ей Всесоюзной конференции. - Запорожье, 1989. - с. 100 - 101.

24. Скорняков Э. С., Кваша Э. Н., Никитина Л. Б. Теоретический анализ напряженно-деформированного состояний сверхкрупногабаритных шин для определения показателя эксплуатационной производительности // Совершенствование качества и технологии производства крупногабаритных автомобильных и сельскохозяйственных шин: Сборник научных трудов. - М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1990. - С. 44 - 53.

25. Кваша Э. Н. Напряженно-деформированное состояние шины, взаимодействующей с грунтом // Там же. - С. 97 - 103.

26. Скорняков Э. С., Кваша Э. Н., Плеханов А. В., Прусаков А. П. Расчет ресурса сверхкрупногабаритных шин // Проблемы шин и резинокордных композитов: Сборник научных трудов II -го Всесоюзного симпозиума. - М.: Изд-во НИИШП, 1990. - С. 3 - 7.

27. Лаптев В. Н., Ищенко В. А., Кваша Э. Н. и др. Исследование влияния конструктивных факторов на напряженно-деформированное состояние металлокордных радиальных КГШ // Там же. - С. 75 - 77.

28. Ищенко В. А., Кваша Э. Н. Термонапряженное состояние резинокордных оболочек шин при изготовлении // Моделирование и методы расчета процессов тепломассопереноса: Сборник научных трудов. - Днепропетровск, Изд-во ДГУ, 1990. - С. 108 - 111.

29. Кваша Э. Н. Некоторые вопросы потери устойчивости пневматических шин // Проблемы шин и резинокордных композитов: Сборник научных трудов III -го Всесоюзного симпозиума. - М.: Изд-во НИИШП, 1991. - С. 3 - 8.

30. Полонов А. М., Смирнов А. Г., Кваша Э. Н. Напряженно-деформированное и тепловое состояние крупногабаритных шин с различной формой профиля // Там же. - С. 9 - 11.

31. Суворова Ю. В., Кваша Э. Н., Чупилко Т. А. Расчет напряженно-деформированного состояния крупногабаритных шин с учетом вязких эффектов и температуры // Механика композитных материалов. - 1991. - N 4. - С. 677 - 682.

32. Полонов А. М., Смирнов А. Г., Кваша Э. Н., Прокопенко В. А. Особенности конструирования крупногабаритных шин с неравновесным профилем поперечного сечения // Каучук и резина. - 1991. - N 10. - С. 24 - 25.

33. Скорняков Э. С., Кваша Э. Н., Хоменя А. А., Войков В. П. Эксплуатация и ремонт крупногабаритных шин. - М.: Химия, 1991. - 128 с.

34. Кваша Э. Н. Термонапряженное состояние металлокордных пневматических шин // Численные методы и математическое моделирование тепломассопереноса: Сборник научных трудов. - Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1991. - С. 101 - 106.

35. А. С. 1630919 СССР, В 60 С 23/18. Колесо транспортного средства / В. И. Дорошенко, Э. С. Скорняков, В. А. Павлов, А. В. Дорошенко и Э. Н. Кваша. - Оpubл. 28.02.91. Бюл. N 8.

36. Смирнов А. Г., Кваша Э. Н., Онищенко Е. С., Каренина Н. Л. Совершенствование конструкции крупногабаритных шин методом математического моделирования // Производство и использование эластомеров. - 1992. - С. 11 - 14.

37. Скорняков Э. С., Кваша Э. Н., Плеханов А. В., Прусаков А. П. Прогнозирование работоспособности пневматических шин // Тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции "Эластомеры". - Рига, 1992. - С. 148-149.

Кваша

Заказ N2809. Тираж 100 экз.

НИИ КГШ г.Днепропетровск

467423

AB 25.590