

Программа полугодового спецкурса  
2005 - 2006  
«Введение в механику шин».

Лектор: проф. С.В. Шешенин

Введение.

Шина, несмотря на кажущуюся простоту конструкции, является высокотехнологичным изделием, имеет сложную внутреннюю структуру и состоит из слоев чистой резины и резинокорда. Внутренняя структура шин и свойства структурных составляющих приводят к трудностям при построении адекватной механической модели. Во-первых, шин представляет собой сильно неоднородную структуру. Различие в модулях упругости для резинокорда и резины может составлять более 1000 раз, а для нитей корда и резины - более  $10^5$  раз. Во-вторых, слои резинокорда сильно анизотропны. Различие в модулях по разным направлениям может быть снова более 1000 раз. Чистая резина - это мало сжимаемый материал. Кроме этого, шина испытывает большие деформации, перемещения и повороты, что усложняет проблему при численном моделировании шин. Кроме этого шина - это пограничный случай между трехмерным телом и оболочкой. Механика шин представляет собой специфический раздел механики композитов, объединяющий вопросы собственно механического моделирования и вычислительных методов, или вычислительной механики. По мере развития вычислительной техники вторая составляющая становится все более существенной. Механика шин также подразделяется на внутреннюю и внешнюю. Внешняя механика изучает взаимодействие шины с остальной конструкцией автомобиля. Внутренняя механика рассматривает явления в самой шине. Спецкурс посвящен в основном внутренней механике. Внутренняя механика включает экспериментальные исследования, имеющие двоякую цель: 1) определение параметров механической модели и 2) верификацию численного моделирования. Поэтому наряду с предлагаемым спецкурсом разработана задача механического практикума для студентов 4-го курса. В этой задаче рассматриваются экспериментальные методы определения упругих и вязкоупругих свойств резинокорда. Данный спецкурс и задача механического практикума разработаны как на основе материала, взятого из научной литературы (большей частью на английском языке), так и собственных исследований автора, более 10 лет работающего в области механики шин. Эти исследования финансировались РФФИ, ИНТАС, АФГИР. На механико-математическом факультете МГУ такой спецкурс подготовлен впервые. Поскольку ряд разделов спецкурса связан с изображениями и чертежами, то при его проведении предполагается использовать мультимедийный проектор и компьютер. Спецкурс рассчитан на студентов 4-го, 5-го курсов и аспирантов.

1. Геометрия и конструкция шин. История развития конструкций шин.

В этом вводном разделе описывается внутренняя конструкция шины для легковых и грузовых автомобилей и сельскохозяйственной техники. Объясняется различие в назначении и конструкции шин. Пневматическая шина возникла во второй половине 19 века. В июне 1891 года братьями Эдуард и Андре Мишлен подали патентные заявки на изобретение съемной шины. Состоявшийся в сентябре того же года велопробег Париж — Брест — Париж был использован, чтобы разрекламировать изобретение. Так появилась на свет пневматическая шина. Затем требовалось усовершенствовать конструкцию и обеспечить разнообразие моделей, чтобы шина отвечала всем требованиям механических

средств передвижения. Эта отрасль, если оглянуться на век назад, продемонстрировала удивительный взлет. Технологическая эволюция транспортных средств повлекла за собой развитие шинного производства, которое в течение нескольких десятилетий стало высокотехнологичным. Этот процесс был отмечен несколькими важными событиями. Наиболее знаменитое из них — изобретение радиальной шины.

Пневматическая шина в настоящее время имеет множество вариантов конструкции. Основной способ классификации основан на расположении кордных нитей. Согласно этой классификации вводятся два основных типа шин - диагональные и радиальные. Впервые радиальные шины были предложены компанией Мишлен в тридцатых годах 20 века и теперь все легковые шины имеют такую конструкцию. Дальнейшее изложение вводится в основном применительно к легковым радиальным шинам. Детально изучается внутренняя структура таких шин, основными силовыми элементами которой являются слои каркаса и брекера. Излагаются свойства и строение этих слоев, состоящих из обрешиненных кордных нитей.

## 2. Задачи внутренней механики шин.

В этом разделе дается общее описание задач механики шин. При эксплуатации на шину воздействуют самые разнообразные нагрузки. Например, нагрузка, на которую рассчитана шина велосипеда, составляет приблизительно 50 кг, в то время как нагрузка, которой подвергаются крупногабаритные шины строительной техники, доходит до 100 т. Пятно контакта с поверхностью дороги у каждой из шин нашего автомобиля практически идентично площади нашей ладони. При этом на повороте оно должно создавать усилие порядка 1500 N. Шина самолета должна передавать ускорение порядка  $1,7 \text{ м/с}^2$ . Для этого необходимо, в частности, расширять знания о механике шин. Прежде всего, задача определения внутреннего напряженно-деформированного состояния, расчета тепловыделения, определения зоны контакта с дорогой и контактных усилий, вычисления сопротивления качению. Также в более сжатой форме описывается проблема аквапланирования и шумо выделения. Последняя проблема является весьма актуальной в связи с ужесточением требований и, частично, связана с вычислением НДС шины, поскольку одним из источников шума служат механические высокочастотные колебания. Поэтому рассматривается задача вычисления резонансных частот. Задача определения сопротивления качению также является актуальной практической проблемой, поскольку значительная энергия теряется из-за преодоления этого сопротивления.

## 3. Простейшая задача - наполнение шины воздухом под давлением.

Как отмечалось, шина - сложная конструкция. Поэтому первые расчетные схемы (механические модели) касались только простого нагружения шин - внутренним давлением и вертикальной нагрузкой в условиях статики. Самой простой одномерной моделью является кольцо на упругом основании. Следующей по сложности уже двумерной моделью является мембрана (безмоментная сетчатая или анизотропная оболочка). Даются определения, касающиеся мембраны, и выводятся общие уравнения. Для изучения поведения шины при накачке она может быть уподоблена мембране, т. е. геометрической конструкции, определяемой своей средней поверхностью с нулевой жесткостью изгиба и способной развивать только усилия растяжения, сжатия и сдвига в срединной плоскости. Эта мембрана вращается вокруг оси колеса и не является растяжимой. Под срединной поверхностью понимают поверхность, образуемая каркасом, предназначенным для удержания давления. Рассматриваются этапы определения параметров шины, дается понятие соответствия геометрии и конструкции

#### 4. Модель шины - трехслойная оболочка.

Следующая по сложности модель шины - это упругая оболочка, учитывающая моментные напряжения. Развитием является трехслойная оболочка, состоящая из каркаса, прослойки резины и еще одного слоя, моделирующего брекер. Формулируется система уравнений и обсуждаются численные методы решения. Показывается применимость данной модели для прикидочного расчета осадки шины на плоскость.

#### 5. Трехмерная модель шины. Деформация при сжатии. Изгибы в глубине толщины шины.

Приложение нагрузки к центру колеса, когда шина опирается на поверхность дороги (задача об осадке), создает пятно контакта между шиной и дорогой. Размер его определяется равновесием между давлением на поверхность дороги в этой зоне и приложенной нагрузкой. Показывается, что для точного определения пятна контакта и изгибных напряжений в зоне контакта, необходима трехмерная модель шины. С другой стороны, с помощью простых механических и геометрических соображений показывается характер распределения изгибных напряжений по толщине шины в зоне контакта. Далее дается полная система уравнений трехмерной модели на основе нелинейных уравнений теории упругости, так называемая полная лагранжева формулировка. Конечно, только простейшие модели могут иметь аналитическое решение. Для трехмерной модели необходимо применять численные методы. Поэтому в данном разделе описывается пошаговый метод решения и дискретизации методом конечных элементов. Приводятся алгоритмы решения статической контактной задачи.

#### 6. Осредненные свойства резинокорда. Работа резинокорда при растяжении. Геометрия и модули слоя. Различные способы определения эффективных модулей резинокорда.

Как уже отмечалось, шина содержит некоторое число резинокордных слоев. Резинокорд представляет собой волокнистый двухкомпонентный композит, составленный из высокоэластического связующего (резины) и корда. Резину изготавливают на основе различных каучуков как синтетических (изопреновые, бутадиен-стирольные, бутадиеновые, бутилкаучук), так и натурального. В качестве корда применяют полиэфирный, вискозный, полиамидный корд и металлокорд. Естественно встает задача определения эффективных свойств резинокордного слоя. Излагаются различные способы определения эффективных упругих свойств слоя, представляющего собой однонаправленный волокнистый композит. Это, прежде всего инженерные методы, а также метод, основанный на методе осреднения. На конкретных данных показывается точность различных расчетных схем. Также излагаются простейшие методы определения эффективных функций релаксации.

#### 7. Экспериментальное определение свойств резинокорда. Слой резино-корда с углом $\pm\alpha$ при растяжении.

Приводятся схемы экспериментального определения эффективных свойств резинокорда. Основным образцом для испытаний служит симметричный двухслойный резинокорд, волокна которого расположены симметрично под углом  $\pm\alpha$  к оси растяжения. Приводятся кривые одноосного растяжения для различных углов и различных скоростей

деформирования. Отмечаются основные черты кривой растяжения: нелинейный начальный участок, затем протяженный линейный участок и, наконец, снова нелинейный участок. При этом студентам демонстрируются данные, полученные в экспериментах, проведенных в Институте механике МГУ. С помощью этих экспериментальных данных показывается, что резинокорд имеет ярко выраженные вязкоупругие свойства. Приводятся результаты сравнения теоретического вычисленных эффективных модулей резинокорда с модулями, определенными экспериментально. Демонстрируется типичная точность теоретического расчета, что важно для понимания характерной точности, соответствующей расчету шин. Показывается, что свойства обрешиненного корда изменяются по отношению к не обрешиненному корду. Поэтому для того, чтобы использовать теоретические методы расчета эффективных модулей, нужно сначала определить свойства обрешиненного корда, что достигается путем решения обратной задачи. Дается ее описание, и приводятся конкретные результаты решения.

#### 8. Пакет слоев, находящийся в состоянии растяжения. Полное и неполное сцепление слоев. Краевой эффект.

Эффективные свойства двухслойного образца, о которых шла речь в предыдущем пункте программы, соответствуют полному сцеплению слоев, когда два слоя двухслойного образца не смещаются относительно друг друга. Однако вблизи продольных краев образца возникает краевой эффект, в зоне которого наблюдается смещение одного слоя относительно другого. Важно отметить, что краевой эффект характерен не только, для двухслойного образца для испытаний, но и для брекера, представляющего собой для легковой шины ту же структуру. В области краевого эффекта, в зависимости от имеющегося угла нитей слою резинокорда испытывают деформацию сдвига. Деформация сдвига с одним и тем же знаком в двух слоях брекера (в отличие от образца) приводит к деформированному состоянию пакета. Связанный с этим наклон, называемый по-другому ply-steer, оказывает значительное влияние на работу шины при езде.

#### 9. Решение задачи о краевом эффекте.

В данном пункте приводится точное решение задачи о краевом эффекте для двухслойного резинокорда, т.е. пакета, состоящего из двух идентичных слоев резино-корда с углами  $\pm\alpha$ . Также дается аналитическое решение для пакета, состоящего реально из трех слоев: одного каркаса с углом корда  $90$  градусов и двух идентичных слоев резино-корда с углами  $\pm\alpha$ .

#### 10. Качение шины. Реакция на нагрузки, испытываемые автомобилем.

Вначале рассматривается стационарное качение шины. Объясняются отличия от статического состояния при осадке (центробежные силы) и стационарного качения. Объясняется различие между ведущим и ведомым колесом: на ведущее колесо помимо давления и вертикальной нагрузки действуют крутящий момент и ненулевая результирующая сила сил трения в зоне контакта с дорогой. Определяется система сил действующих на ведущее и ведомое колеса. Выводится формула для вычисления сопротивления качению рассеянию энергии за счет трения. Поясняется деформирование протектора и роль рисунка протектора. Далее подробно рассматривается алгоритм численного трехмерного моделирования стационарного не стационарного качения.

#### 11. Тепловое состояние шины.

Поскольку резина обладает вязкоупругими свойствами, при циклическом нагружении за счет петли гистерезиса происходит тепловыделение. Приводятся пример шин для карьерных самосвалов, для которых рост температуры может приводить к разрушению шин. Распределение температуры описывается уравнением теплопроводности. Основное внимание уделено выяснению типа граничных условий на внешней и внутренней поверхностях шины. Дается полная формулировка задачи теплопроводности, и поясняются численные методы ее решения.

## 12. Передача усилий. Прохождение поворотов. Определение жесткости отклонения. Двухколесная модель на повороте. Величина жесткости отклонения.

Данный раздел дает связь между внутренней и внешней механикой шин, именно, определяются усилия, передаваемые от шины автомобилю. В передаче усилий между дорогой и автомобилем участвуют различные зоны шины: борт, который в первом приближении можно рассматривать как систему крепления с колесом, боковина, брекер и, наконец, беговая дорожка. Именно на боковину наиболее сильно воздействует внутреннее давление. Брекер ведет себя как балка, испытывающая напряжения растяжения, сдвига по кромке, изгиба по кромке, а также кручения. Беговая дорожка (протектор), которую мы рассмотрели в предыдущем параграфе, работает, главным образом, на сдвиг с жесткостью, которая одновременно зависит от используемой резины и от геометрических характеристик рисунка. Вся совокупность этих элементов должна обеспечить наилучшие параметры при нагрузках, которым подвергается центр колеса вследствие действий водителя и механики, и которые имеются между ним и центром колеса. Одним из важных параметров является жесткость отклонения при поворотах, которая подробно изучается в данном пункте.

### Литература.

1. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984.
2. Б.Л. Бухин. Введение в механику пневматических шин. М.: Химия, 1988.
3. Курс по механике шин, предоставленный компанией Мишлен, 2001.