

## РАЗДЕЛ 1. НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИГАТЕЛИ

### **Исследование и сравнительный прочностной анализ ободьев автомобильных колес с пяти- и пятнадцатиградусными посадочными полками**

д.т.н. проф. Балабин И.В., д.т.н. проф. Фомичев Ю.И., к.т.н. доц. Чабунин И.С.,  
к.т.н. доц. Карташов Н.С.  
МГТУ «МАМИ», МГТУ им. Н.Э. Баумана  
(495) 223-05-23 доб. 1457

*Аннотация.* В статье содержится решение задачи определения напряженно-деформированного состояния ободьев автомобильных колес с пяти- и пятнадцатиградусными посадочными полками методом конечных элементов. При этом применялся конечный элемент в виде короткого кольцевого усеченного конуса, наиболее полно учитывающий специфику конструкции, состоящей из оболочек вращения с резко изменяющимися жесткостями и нагрузками. Сделаны выводы о преимуществе для бескамерных шин грузовых автомобилей, автобусов и автопоездов конструкции колеса с ободом, имеющим пятнадцатиградусные посадочные полки как с точки зрения эксплуатационных качеств, так и с точки зрения прочности.

*Ключевые слова:* расчеты на прочность, автомобильные колеса.

Одной из главных проблемных задач, стоящей перед разработчиками автомобильных колес, является обеспечение гарантированной герметизации рабочей полости шины и надежного удержания шины на ободе в процессе движения транспортного средства в разнообразных дорожных условиях.

В прошлом проблема герметизации шины была решена применением ездовой камеры. Однако камера, которая представляет собой тонкостенную резиновую оболочку, находящуюся под значительным внутренним давлением воздуха, снимая вопрос по обеспечению герметичности рабочей полости шины, одновременно является причиной повышенной ее уязвимости со стороны колющих и режущих предметов, наезд на которые приводит к мгновенной разгерметизации шины, сходу ее бортов с посадочных поверхностей обода и потере несущей способности.

Для решения второй проблемы в конструкцию бортовой части шины был введен металлический проволочный сердечник, благодаря которому жестко фиксируется посадочный диаметр шины, а плотность ее посадки на ободе достигается благодаря силам трения, возникающим между контактирующими боковыми стенками бортов шины и бортовыми закраинами обода за счет избыточного давления воздуха. Однако в случае разгерметизации шины эти силы быстро исчезают.

Важным шагом в развитии колес, предназначенных для работы с пневматическими шинами и легковых, и грузовых автомобилей, явилось введение конуса на посадочных поверхностях обода с углом наклона пять градусов, который обеспечивал посадку шины на ободе с определенным натягом и точно центрировал ее относительно оси вращения колеса, что при возросших скоростях движения оказывало серьезное положительное влияние на процесс качения, сводя до минимума вредные колебания и связанные с ним негативные динамические процессы, сопровождающие работу автомобиля.

Введение натяга на конических посадочных полках приводило к тому, что часть осевого усилия, которое при отсутствии натяга на посадочных полках воспринималось полностью стенкой бортовой закраины обода, теперь уже распределялось между бортовой закраиной и посадочными полками.

С ростом скоростей движения транспортных средств проблема повышенной уязвимости камерной шины со стороны проколов стала стоять острее. Выход оказался простой – исключить из конструкции шины причину этой уязвимости, т.е. саму камеру. Появились бескамерные шины. По внешнему виду бескамерная шина почти не отличается от стандартной камерной шины и по существу представляет собой усовершенствованную покрышку, которая выполняет функции обычной покрышки и камеры одновременно. По своему устройству она отличается от покрышки камерной шины наличием герметизирующего слоя, уплотнительной бортовой ленты и некоторыми особенностями конструкции борта [1].

Переход от камерных к бескамерным шинам наиболее безболезненным оказался для легковых автомобилей, так как их колеса изначально имели неразборный глубокий обод, который никаких серьезных проблем для перехода с камерных на бескамерные шины не создавал, разве что выдвигал повышенные требования к качеству наружной (обращенной к шине) поверхности обода, которая должна была обеспечивать герметичность рабочей полости шины, а на посадочных полках для более надежного удержания бортов шины и предотвращения ее мгновенной разгерметизации в случае бокового удара, например, при наезде на бордюрный камень тротуара, стали применять упоры, так называемые «хампы». При этом сохранялась полная универсальность конструкции колеса для применения ее как с камерными, так и с бескамерными шинами. В последнем случае колеса оборудовались специальным вентилем, имеющим герметичное крепление к ободу.

Для колес грузовых автомобилей процесс перехода на бескамерные шины хотя и неотвратим, однако связан с необходимостью решения ряда серьезных проблем, из которых самой серьезной является обеспечение надежности работы колесного узла во всех чрезвычайно разнообразных дорожных условиях, включая грунтовые разбитые дороги и сезонное бездорожье. Это обстоятельство в сочетании с высокими нагрузками и применением многослойных шин сформировало концепцию колеса, имеющего разборный двух, трех и более компонентный обод с высокой бортовой закраиной, надежно удерживающей борт шины при движении автомобиля на крутых поворотах, в колее и по пересеченной местности.

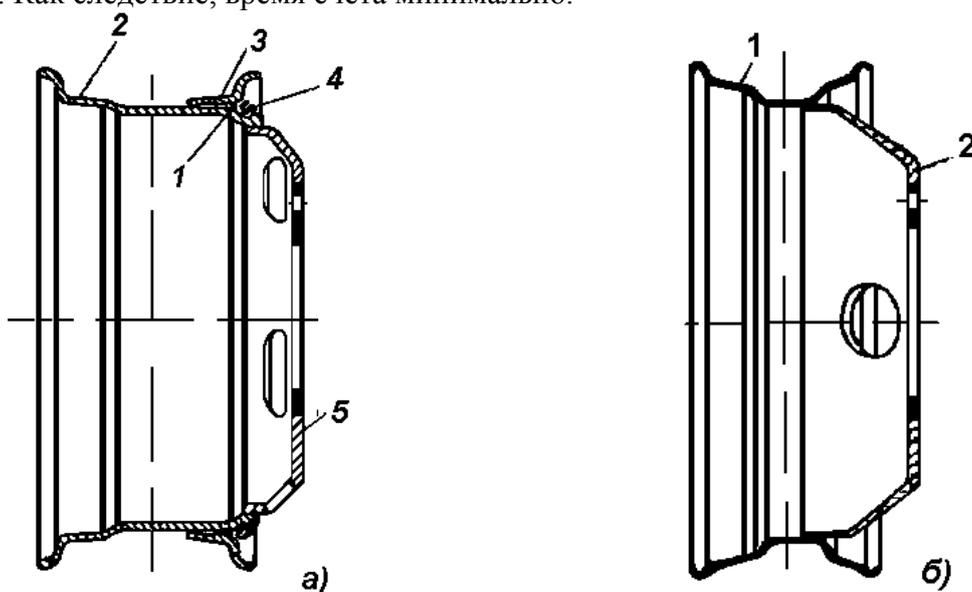
Наличие многослойного каркаса с жесткими бортами предопределило применение разборной конструкции обода, позволяя осуществлять ручной монтаж-демонтаж шин, не прибегая к специальному монтажному оборудованию, отсутствие которого и его дефицит в настоящем является тормозом к переходу на неразборные конструкции обода.

Поэтому на первых этапах основной конструкции колес грузовых автомобилей оставался разборный обод с пятиградусными посадочными полками, который показан на рисунке 1. Герметичность рабочей полости шины создавалась путем уплотнения зазоров между основанием обода и сопрягаемыми элементами, в частности, съёмной посадочной полкой, объединенной с замочным кольцом с помощью кольцевого резинового шнура, как это показано на рисунке 1.

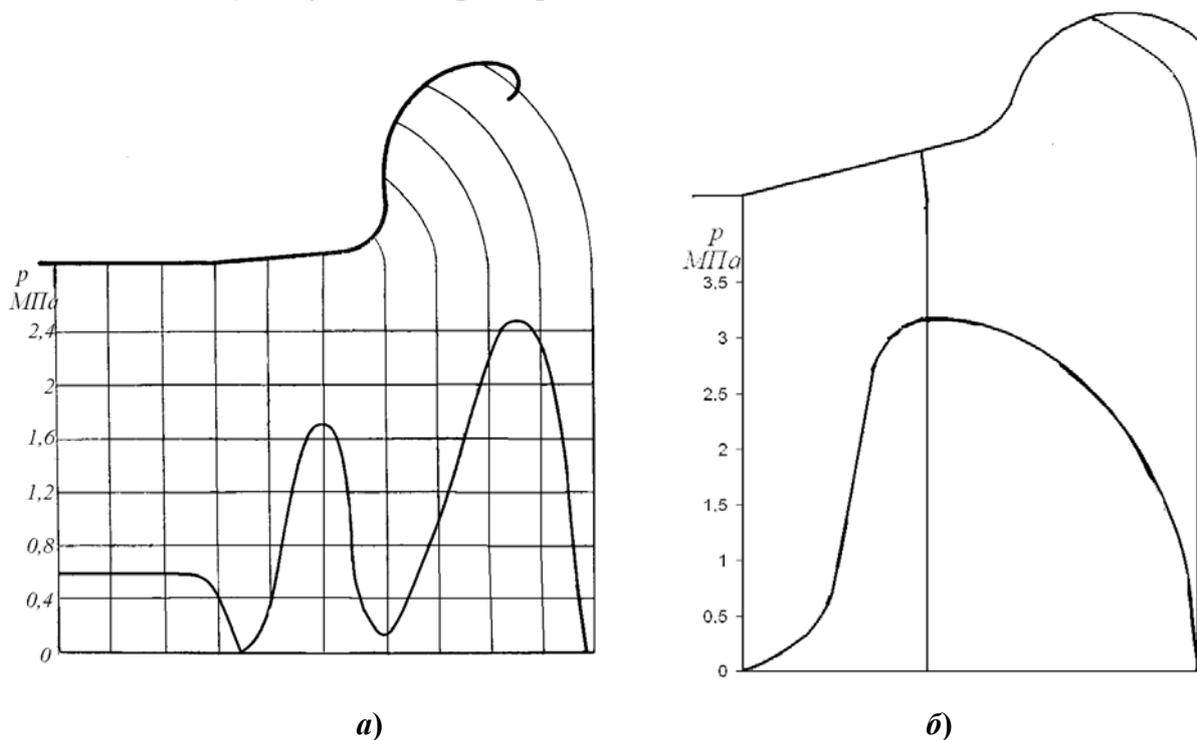
Нагрузка от шины, обусловленная избыточным давлением воздуха, как видно из рисунка 2,а, воспринимается, в основном, двумя поверхностями – конической посадочной полкой и бортовой закраиной. С учетом допусков при изготовлении шины и обода усилие прижатия шины к ободу в зоне закраины может быть большим или меньшим, и если это усилие окажется недостаточным, то вероятно возникновение при качении колеса циклического характера контактирования шины и обода в этой зоне и, как следствие, появление кольцевых трещин в бортовой части шины, которые могут вызвать разрушение последней даже при незначительном ее пробеге. Поэтому увеличение плотности посадки шины на посадочном конусе, положительно влияя на обеспечение герметичности рабочей полости шины, приводит к ослаблению контакта в области бортовой закраины, что является, как показано выше, нежелательным.

По своей сути колесо является тонкостенным телом вращения, состоящим из обода и диска. Соотношение толщины и габаритов колес позволяет отнести их к классу тонкостенных оболочечных конструкций [2]. Использование для анализа тонкостенных тел вращения, какими являются колеса, осесимметричных оболочечных конечных элементов является наи-

более эффективным решением. В этом случае необходима только меридиональная дискретизация и для достижения необходимой точности решения достаточно небольшого количества элементов. Как следствие, время счета минимально.



**Рисунок 1 – Конструкция колес для бескамерных шин грузовых автомобилей:**  
**а) с разборным ободом: 1 – резиновый уплотнительный шнур; 2 – обод; 3 – бортовое кольцо; 4 – замочное кольцо; 5 – диск;**  
**б) с глубоким неразборным ободом: 1 – обод; 2 – диск**



**Рисунок 2 – Эпюры силового взаимодействия шины и обода: а) с пятиградусными посадочными полками; б) с пятнадцатиградусными полками**

Наиболее перспективным является метод конечных элементов с осесимметричными элементами оболочечного типа, позволяющий рассчитывать многослойные оболочки вращения при действии произвольных нагрузок. За основу взят численный метод, изложенный в монографии [2] и посвященный его применению к расчетам тонкостенных конструкций различных отраслей машиностроения.

Основные характеристики используемых численного метода и реализующих его программ следующие.

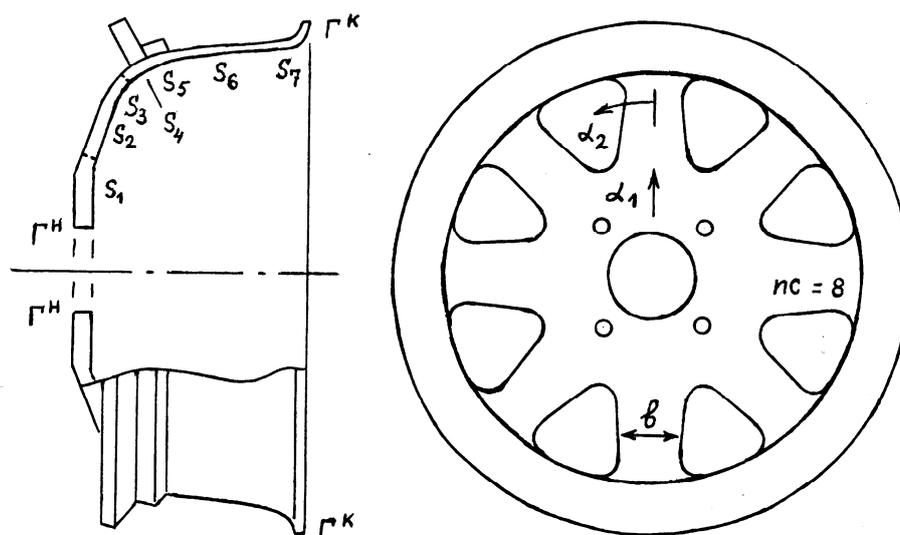
Разработаны метод и комплекс программ прочностного расчетного анализа сложных современных оболочечных конструкций новой техники в условиях воздействия переменных вдоль меридионального и окружного направлений температурно-силовых нагрузок. Метод анализа заключается в расчете напряженно-деформированного состояния и в исследовании устойчивости конструкции под действием поверхностно-двумерных нагрузок. Исследование устойчивости состоит в определении бифуркационных критических нагрузок и в вычислении формы потери устойчивости.

Комплекс состоит из программы SHELLF95 и программы FOURIER.

Метод и программа SHELLF95 предназначены для расчета составных многослойных тонкостенных упругих осесимметричных конструктивно или/и физически ортотропных оболочечных конструкций. При составлении расчетной схемы оболочечная конструкция расчленяется на ряд отсеков, или характерных зон. Отсеки конструкции, выполненные в виде оболочек вращения с произвольной гладкой формой меридианов, могут состоять из произвольного числа ортотропных или/и изотропных слоев с регулярно расположенными по окружности утонениями или отверстиями и слоев продольных подкрепляющих элементов (ребер жесткости, стрингеров, спиц). Каждый слой отсека конструкции может иметь переменные вдоль меридиана геометрические и механические характеристики.

Слои оболочечной конструкции могут состоять из различных композиционных ортотропных или однородных изотропных материалов, набора продольных и поперечных подкрепляющих элементов, шпангоутов. В расчетную схему составной оболочечной конструкции включены цилиндр, конус, сфера, тор, оживальная оболочка, кольцевая пластина, круглая пластина, оболочка вращения произвольной формы как наиболее используемые в прикладной науке и технике. Реализованные возможности метода и программы позволяют передать в расчетной схеме произвольное число и тип слоев в каждой оболочке конструкции, включать в расчетную схему одновременно различные конфигурации типов оболочек вращения, в том числе рассчитывать перегибные оболочечные конструкции и конструкции, включающие одновременно оболочки вращения положительной, отрицательной и нулевой гауссовой кривизны.

Характерная схема автомобильного колеса как составной оболочечной конструкции приведена на рисунке 3. Введенное на рисунке обозначение  $S_i$  определяет номер оболочки.



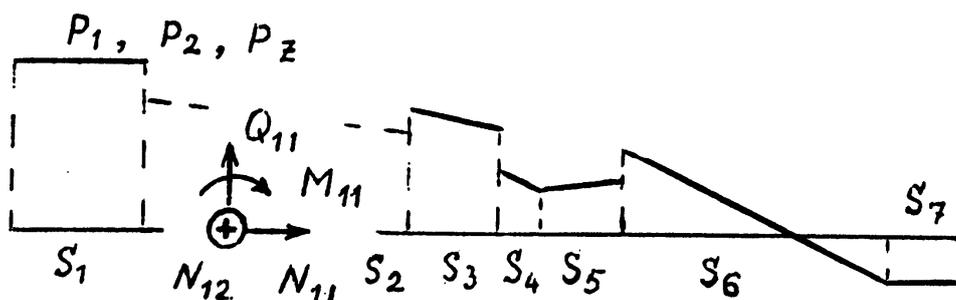
**Рисунок 3 – Типичная схема и вид рассматриваемых колес как оболочечных конструкций**

На составную многослойную оболочечную конструкцию в общем случае могут действовать следующие нагрузки:

- приложенные к кольцевым контурам неосесимметричные внешние продольные, сдвигающие, перерезывающие усилия и изгибающие моменты;
- переменные вдоль меридиана неосесимметричные поверхностные нагрузки (давление);
- переменные вдоль меридиана, неосесимметричные, линейно меняющиеся по толщине слоев температурные поля.

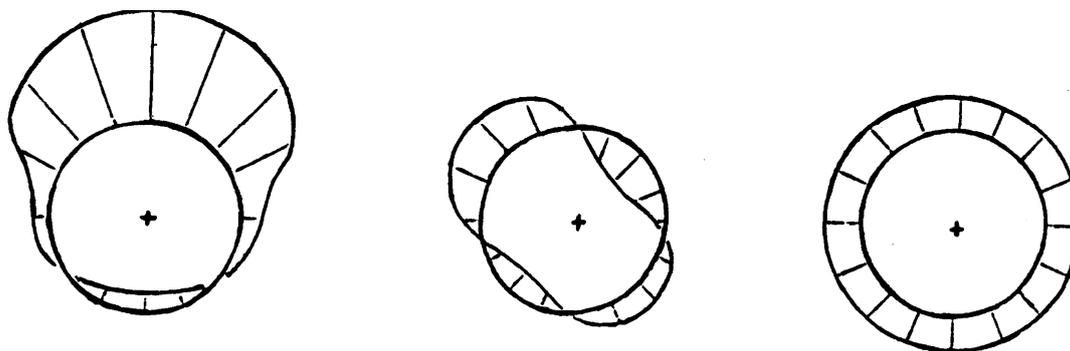
На торцах оболочечной конструкции в качестве граничных условий могут быть заданы неосесимметричные усилия и моменты или соответствующие перемещения и углы поворотов.

Характерные меридиональные профили давления и температуры на поверхностях слоев изображены на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Характерные меридиональные профили поверхностных нагрузок и контурные нагрузки**

Характерные окружные профили температурно-силовых нагрузок приведены на рисунке 5.



**Рисунок 5 – Характерные окружные профили нагрузок**

Принято, что все неосесимметричные силовые и кинематические нагрузки симметричны относительно плоскости, проходящей через ось вращения конструкции и меридианы со значением окружной координаты  $0^\circ, \pm 180^\circ (0, \pm \pi)$ .

Протяженность по окружному направлению неосесимметричных нагрузок, поведение которых достаточно точно передается реализованными возможностями расчетной схемы, составляет от пяти градусов до трехсот шестидесяти градусов. Осесимметричное нагружение является частным случаем рассматриваемого неосесимметричного нагружения и описывается принятой схемой исследования. В этом случае сильно сокращаются вычислительные затраты ПЭВИ.

Решение осуществляется методом конечных элементов в сочетании с методом Фурье. Применяется конечный элемент в виде короткого кольцевого усеченного конуса, наиболее полно учитывающий специфику конструкций, состоящих из оболочек вращения с резко меняющимися жесткостями и нагрузками. Аппроксимация перемещений докритического и появляющегося при потере устойчивости дополнительных состояний вдоль меридиана осуществляется полиномами, а по окружному направлению – соответствующими рядами Фурье. Используются конечные элементы переменной длины вдоль меридиана для того, чтобы пе-

редать особенности конструкции и нагрузок, краевые эффекты и безмоментные части решений. Для решения больших систем линейных алгебраических уравнений и для вычисления определителей систем в проблеме устойчивости применяется прямой клеточный метод линейной алгебры.

Программа FOURIER предназначена для разложения неосесимметричных нагрузок в ряды Фурье. Программа позволяет визуализировать на экране монитора ПЭВМ графическую информацию по профилям неосесимметричных нагрузок. Программа также выдает в файлы на диске ПЭВМ результаты, которые используются программой прочностного анализа в качестве исходных данных.

Широкий набор включенных в рассмотрение типов оболочек, произвольность нагрузок, большие возможности программ по отношению к числам конечных элементов и гармоник, гибкая система ввода-вывода позволяют рассчитывать большой ряд практических оболочечных конструкций при реальных условиях нагружения. Программа и результаты расчетов по ней конкретных оболочечных конструкций описаны в монографии [2].

Высота закраины достаточно большая, что вызывает значительные изгибные напряжения. Для их уменьшения бортовая закраина имеет переменную толщину.

Для расчета выбран обод колеса 7,0-20 с пятиградусной посадочной полкой. В расчетной схеме исследуемый обод представлялся пятью отсеками  $S_i$ ,  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ . Разбиение обода на данное число отсеков обусловлено особенностями геометрии обода как составной оболочечной конструкции.

Последовательность нумерации отсеков идет слева направо в соответствии со схемой контура обода, приведенной на рисунке 2,а. Начало отсчета по горизонтальному направлению вдоль оси вращения выбрано в точке соединения отсеков  $S_1$  и  $S_2$ , т.е. в начале конической полки.

Первый отсек  $S_1$  представляет собой цилиндрическую оболочку длиной 140 мм, радиусом внутренней поверхности 243,5 мм и толщиной 5,5 мм.

Второй отсек  $S_2$  представляет собой усеченную коническую оболочку длиной 30 мм по оси вращения, постоянным внутренним радиусом 243,5 мм и переменным наружным радиусом. Толщина оболочки меняется линейно от 5,5 мм до 8,12 мм. Данный отсек представляет собой коническую 5°-ую посадочную полку, образуемую наружной поверхностью оболочки.

Третий отсек  $S_3$  представляет собой практически четверть тора отрицательной гауссовой кривизны с переходом внутренней поверхности от горизонтальной к вертикальной на уровне 41 мм по оси вращения и на уровне 261 мм по радиусу. Толщина отсека переменна и составляет 8,12 мм в начале, 10,3 мм в середине и 7,1 мм в конце. Наружная поверхность данного отсека представляет собой часть тора с радиусом 8 мм.

Четвертый отсек  $S_4$  представляет собой пологую усеченную коническую оболочку длиной 12 мм по радиусу. Внутренняя поверхность является вертикальной на уровне 41 мм по оси вращения. Толщина отсека меняется линейно от 7,1 мм в начале до 5,1 мм в конце. Данный отсек моделирует начало бортовой закраины.

Пятый отсек  $S_5$  представляет собой часть тора положительной гауссовой кривизны с углом раствора 114°. Толщина отсека переменна и образуется радиусом 11,6 мм внутренней поверхности и радиусом 19 мм наружной поверхности. Таким образом, толщина отсека составляет 5,1 мм у начала и максимально 7,5 мм у начала скругления радиусом около 4 мм в конце. Данный отсек вместе с отсеком  $S_4$  моделирует бортовую закраину.

Координатная поверхность, передающая общую геометрическую форму обода как составную оболочечную конструкцию, в расчетной схеме проходила по серединам толщин отсеков  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_4$  и  $S_5$ . В отсеке  $S_3$  координатная поверхность проходила внутри толщины отсека, имела радиус 8,5 мм и соединяла непрерывно прямые координатной поверхности соответствующих соседних отсеков  $S_2$  и  $S_4$ .

Примененное в расчетной схеме расположение координатной поверхности оболочечной конструкции и дискретизация толщины обеспечили непрерывность меридианов внутренней и наружной поверхностей моделируемого обода.

Поверхностная нагрузка на обод задавалась в соответствии с рисунком 2,а. Данная эпюра воспроизводит давление в шине 0,6 МПа, натяг шины на посадочную полку и воздействие шины на бортовую закраину. Вследствие равномерности давления по окружной координате данная задача осесимметричная. При осесимметричном нагружении отпадает необходимость разложения нагрузок в ряды Фурье по окружной координате и решение проводится только для одной нулевой гармоники.

В численном расчете обод как составная оболочечная конструкция разбивался по соответствующим отсекам  $S_i$ ,  $i = 1, 2, 3, 4, 5$  на 8, 5, 4, 4 и 14 конечных элементов. Отсеки  $S_2$  и  $S_4$  разбивались равномерно. Отсеки  $S_1$ ,  $S_3$  и  $S_5$  разбивались на конечные элементы переменных длин по образующей координатной поверхности. Разбиение на конечные элементы осуществлялось из условия описания сложной геометрической формы обода, изменения толщины обода, изменения профиля давления и обеспечения точности численного расчета.

Граничные условия в расчете ставились следующим образом.

На начальном торце задавалось нулевое смещение вдоль меридионального направления, нулевое перерезывающее усилие и нулевой момент, то есть разрешались радиальное смещение и угол поворота. Таким образом, в начале оболочечной конструкции на цилиндрической части обеспечивалось условие безмоментного состояния, и данный торец не оказывал влияния на наиболее интересующую зону обода в районе посадочной полки и бортовой закраины.

Программа для ПЭВМ, реализующая численный метод конечных элементов, весьма эффективна. Так, на описанный расчет с 35 конечными элементами, затрачено менее 0,5 секунды машинного времени.

Аналогичный расчет автомобильного колеса с пятнадцатиградусной посадочной полкой описан в работе [3].

Эпюры меридиональных и окружных напряжений, действующих в ободе при давлении воздуха в шине 0,6 МПа, приведены на рисунке 6,а. Как видно, их максимальные значения приходятся на бортовую закраину, причем доминирующие напряжения – меридиональные – знакопеременные.

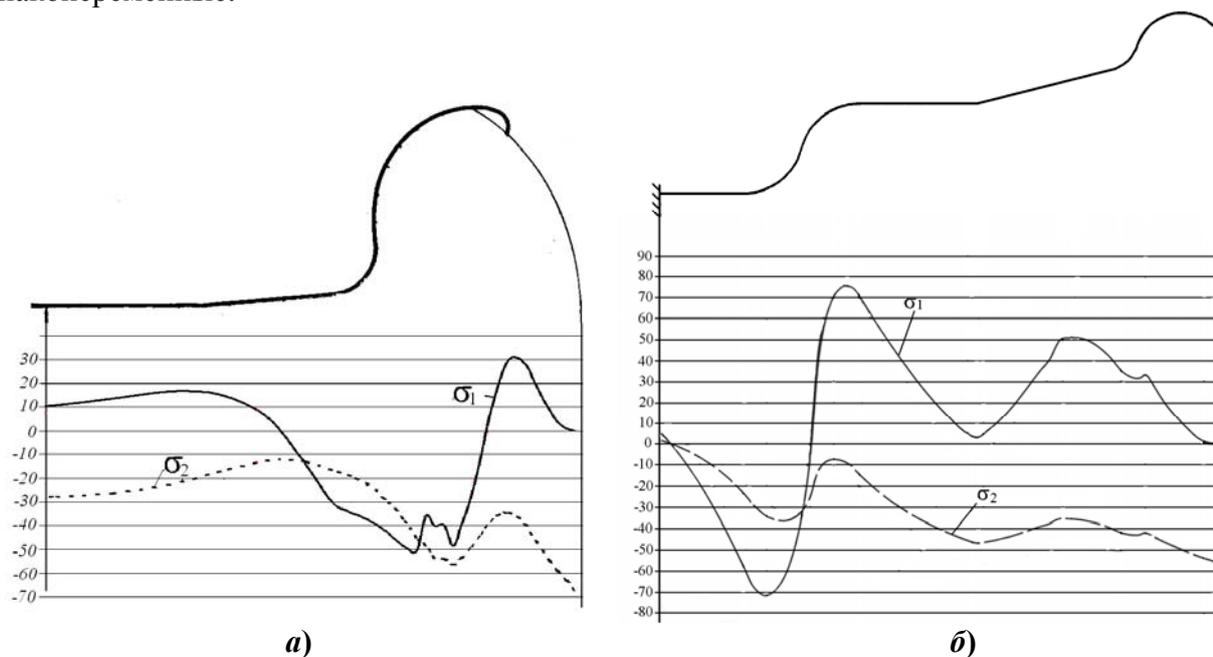


Рисунок 6 – Эпюры меридиональных и окружных напряжений: а) с пятиградусными посадочными полками; б) с пятнадцатиградусными полками

Практика эксплуатации разборной конструкции обода показала, что она не полностью

отвечает требованиям надежности работы в связи с низкой стойкостью уплотнения: со временем кольцевой резиновый шнур, находясь в деформированном состоянии, теряет свои упругие свойства, нарушается плотность соединения и шина теряет герметичность. Все предпринимаемые манипуляции с размерами и конфигурацией уплотнительного шнура оказались не в состоянии радикально решить проблему уплотнения зазоров между отдельными компонентами разборного обода и обеспечить надежную герметизацию шины.

Этот вопрос кардинально решает конструкция глубокого неразъемного обода, посадочные поверхности которого для шины в отличие от обода, применяемого для колес легковых автомобилей с пятиградусным наклоном, имеют угол наклона  $15^\circ$  (рисунок 1,б).

Увеличенный угол наклона позволяет значительную часть усилий от давления воздуха в шине и внешних нагрузок сосредоточить на посадочных полках обода. При этом надобность в высокой бортовой закраине отпадает и ее высота является совсем небольшой. Снижение же высоты бортовой закраины существенно облегчает монтаж-демонтаж шины, что является важным преимуществом конструкции неразборного глубокого обода. Опыт эксплуатации таких колес показал их абсолютную пригодность.

Усилие прижатия шины к ободу, как видно из рисунка 2,б, сосредоточены на одной поверхности, что положительно влияет на усталостную прочность при качении колеса, так как не возникает циклического контактирования шины и обода. Эпюры меридиональных и окружных напряжений, действующих в ободу при давлении воздуха в шине  $0,6 \text{ МПа}$ , приведены на рисунке 6,б. Как видно, их максимальные значения сосредоточены в стенках монтажного ручья. При этом большая глубина ручья, положительно влияя на трудоемкость монтажно-демонтажных операций, вызывает большие изгибные напряжения.

Следует отметить ряд положительных свойств, которыми обладают колеса с неразборным ободом. Это прежде всего минимальная масса и отсутствие съемных деталей, что положительно влияет на надежность работы колеса и практически на все основные эксплуатационные свойства транспортного объекта, включая топливно-экономические, динамику разгона и торможения и многие другие важные характеристики. Совокупность указанных выше свойств с лихвой перекрывает недостатки, связанные с более сложным процессом ручного монтажа-демонтажа шины на обод. Наличие монтажно-демонтажного оборудования, имеющегося в настоящее время в каждом более или менее крупном автомобильном предприятии либо в сервисном центре, полностью устраняет указанный недостаток, поскольку в этом случае монтаж-демонтаж шин на разборный либо на глубокий неразборный обод никаких трудностей не вызывает и принципиально не различается.

#### Литература

1. Автотракторные колеса: Справочник / Под общ. ред. Балабина И.В. – М.: Машиностроение, 1985. – 272 с.
2. Грибанов В.Ф., Крохин И.А., Паничкин Н.Г., Санников В.М., Фомичев Ю.И. Прочность, устойчивость и колебания термонапряженных оболочечных конструкций. – М.: Машиностроение, 1990. – 368 с.
3. Балабин И.В., Фомичев Ю.И., Чабунин И.С. Расчет напряженного состояния неразъемного обода колеса грузовых автомобилей и автобусов // Автомобильная промышленность. – 2003. – № 2. – С. 29 – 30.

### **Совершенствование метода интегральных силовых диаграмм для оценки управляемости и устойчивости автомобиля**

д.т.н. проф. Бахмутов С.В., к.т.н. доц. Ахмедов А.А., Орлов А.Б.  
МГТУ «МАМИ»

*akhm@mami.ru, 8 (495) 223-05-23 доб. 1504*

*Аннотация.* Описана методика оценки автомобильной техники по критериям управляемости и устойчивости на стадии ее проектирования. Методика позволяет решать задачи проектирования и доводки колесной автомобильной техники. В