

По измерению фазовой  $c_f = \frac{\omega}{k(\omega)}$  или групповой  $c_g = \left(\frac{dk}{d\omega}\right)^{-1}$  скоростей находится  $\operatorname{Re} q = k(\omega)$  в формуле (31).

Подставляя найденные выражения для  $q = k(\omega) + i\psi \delta(\omega)$  в (31) определяем  $n^*(q)$ , а затем по формуле (33) находим ядро  $n^*(z)$ . Далее из формулы (32) определяем  $R_n(r - r_1)$ .

Таким образом, на основе измерения рассеянного поля проводится идентификация интегральных и локальных параметров структуры неоднородной среды. Последовательное решение задачи реконструкции параметров структуры среды проводится по схеме, описанной выше.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Franklin J.N. // J. Math. Anal. Appl. — 1970. — V. 31. — P. 682–691.
2. Исимару А. распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. — М.: Мир, 1981. — Т. 2. — 317 с.
3. Мухина И.В. Приближенное сведение к уравнениям Гельмгольца уравнения теории упругости и электродинамики для неоднородных сред. // ПММ. — 1972. — Т. 36, №4. — С. 667–671.
4. Исакович М.А. Общая акустика. — М.: Наука, 1973. — 496 с.
5. Stone W. Ross. The inverse medium (or inhomogeneous medium remote probing) problem and a closed-form inverse scattering solution to the medium synthesis problem // Radio Science. — 1981. — V.16, № 6. — P. 1029–1035.
6. Keys R.G., Weglein A.B. Generalized linear inversion and the first Born theory for acoustic media // J. Math. Phys. — 1983. — V.24, № 6. — P. 1444–1449.

УДК 629.3.027

И.Е. Кракова

### НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОЛЬЦА ПРИ КАЧЕНИИ ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

*Белорусский государственный университет транспорта  
Гомель, Беларусь*

Автомобильная шина является основным звеном, связывающим автомобиль с дорожной поверхностью. Поэтому от технических характеристик шин существенно зависят динамические качества колесных транспортных

средств. Одной из актуальных задач является расчетное определение коэффициента сопротивления качению колеса. Для решения этой задачи необходимо иметь информацию о напряженно-деформированном состоянии колеса при его качении по дорожному покрытию.

Анализ доступной нам литературы показал, что до сих пор расчеты, связанные с определением зависимости радиальной деформации от вертикальных сил выполнялись при статическом нагружении. Нахождение сил взаимодействия с дорогой ограничивалось определением затрат мощности на качение и поворот [1, 2].

В то же время для обеспечения высоких скоростей движения, плавности хода, долговечности, необходимо исследовать механические свойства шины с учетом динамических нагрузок, действующих на ее элементы. Целью данной работы является разработка методики расчета напряженно-деформированного состояния колеса, изготовленного из материала с малым модулем упругости, с помощью моделирования методом конечных элементов. В качестве инструмента для решения поставленной задачи выбран программный комплекс конечно элементного анализа ANSYS.

Первым шагом решения задачи является создание геометрической модели. Чтобы приблизиться к реальным условиям работы автомобильной шины, разработана модель, включающая резиновое кольцо, установленное на стальной оси, которое опирается на твердую горизонтальную поверхность. Она представлена на рис. 1. Построение приведенной модели производилось в ANSYS с помощью операции **Preprocessor >Modeling>Create> Volumes>Cylinder**. Для обеспечения связи между объемами была проведена операция склеивания.

С помощью операций **Material Props>Material Models** задавались свойства материалов. Для внешнего цилиндрического объема в качестве материала выбрана резина с линейными свойствами, модуль упругости которой равен 0,93 МПа, плотность 1300 кг/м<sup>3</sup>, а для оси и горизонтальной поверхности — сталь.

Построение регулярной сетки конечных элементов производилось индивидуально для каждого из объемов. Для конечноэлементного моделирования использовался 4-х узловой пространственный конечный элемент **SOLID185**. В зоне контакта внешнего цилиндрического объема и горизонтальной поверхности сетка была сгущена, чтобы учесть особенности деформирования при больших градиентах напряжений.

Чтобы реализовать условия качения без верчения и проскальзывания, приняты следующие граничные условия. Были запрещены горизонтальные перемещения торцевых поверхностей оси и все перемещения нижней поверхности.

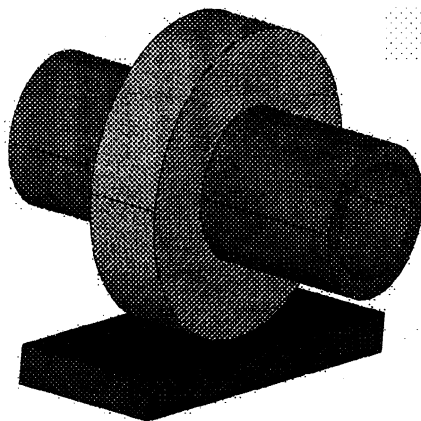


Рис. 1. Геометрическая модель системы

В качестве приложенных нагрузок учитывались сила тяжести и вертикальные силы, действующие на ось. Их значения могут быть получены в результате решения задачи о движении автомобиля [3].

При больших скоростях движения значительными оказываются силы инерции, действующие на элементы колеса. Колесо движется плоскопараллельно. Для любой его точки В можно записать:

$$\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t,$$

где  $\vec{a}_A$  — ускорение точки А оси колеса;  $\vec{a}_{BA}^t$  и  $\vec{a}_{BA}^n$  — касательное и нормальное ускорение точки В в движении вокруг А. При движении автомобиля с установившейся скоростью ускорения  $\vec{a}_A$  и  $\vec{a}_{BA}^t$  равны нулю. Тогда получаем, что  $\vec{a}_B = \vec{a}_{BA}^n$ . В этом случае элементарная сила инерции будет определяться соотношением  $d\vec{F} = -dm \cdot \vec{a}_{BA}^n$ . Таким образом, учет движения колеса может быть осуществлен за счет приложения центробежных сил инерции, исходящих из центра колеса.

В ANSYS учет центробежных сил инерции осуществляется путем задания угловой скорости вращения относительно оси z, совпадающей с осью симметрии кольца. Для этого была выполнена следующая операция **Preprocessor>Loads>Apply>Other>Angular Velocity**. При расчетах значение угловой скорости принималось равным 35 рад/с, что соответствует скорости движения 50 км/ч.

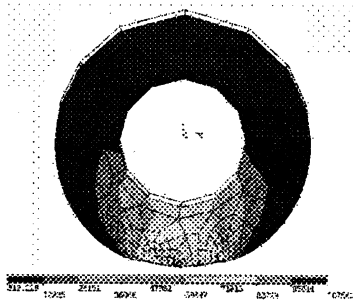


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние кольца с учетом качения

Нагруженная шина соприкасается с поверхностью дороги по площадке, размеры которой определяются значениями приложенных сил. Поэтому для определения радиального перемещения оси колеса, которым моделировалась непосредственно шина и исследования напряженного его состояния, с помощью программного комплекса ANSYS выполнено решение контактной задачи. Поскольку материал колеса имеет малый модуль упругости, то при его деформировании имеют место большие относительные деформации. С этой целью предусмотрено решение задачи с геометрической нелинейностью.

Варьируя значением сосредоточенной силы в пределах от 500 Н до 3000 Н определялись перемещения  $u$ , эквивалентные напряжения, 1-е и 3-е главные напряжения. На рис. 2 приведено напряженно-деформированное состояние внешнего кольца при действии вертикальной нагрузки на внутренний объем 2500 Н.

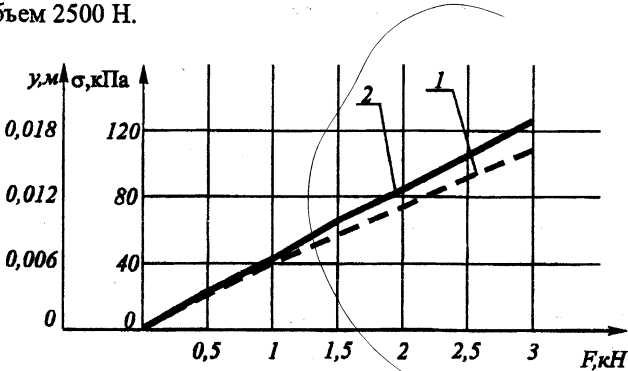


Рис. 3. Графики зависимости перемещений и эквивалентных напряжений от прикладываемой нагрузки

Из рисунка видно, что наибольшие напряжения возникают на границах контактной площадки. На основании полученных результатов построены графики зависимости: перемещений  $y$  (1) и эквивалентных напряжений  $\sigma$  (2) от величины прилагаемой нагрузки (рис. 3).

Анализ результатов показывает, градиент перемещений и напряжений незначительно убывает при увеличении приложенной силы.

Таким образом, разработанный нами новый метод учета центробежных сил позволил определить напряженно-деформированное состояние кольца при его качении по горизонтальной плоскости с учетом динамических нагрузок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля — М.: Машиностроение, 1972.
2. Шимановский А.О., Кракова И.Е. Математическая модель и расчет динамики колесного транспортного средства // Машиностроение. — Мн., 2003. — Вып. 19. — С. 737–741.
3. Pacejka H.B., Besselink I.J. Magic formula tyre model with transient properties// Vehicle System Dynamics.— 27.— 1997.

УДК 691.328

Г.М. Куземкина

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БЕТОННОЙ МАТРИЦЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ АРМАТУРОЙ

*Белорусский государственный университет транспорта  
Гомель, Беларусь*

Постановка арматуры в бетонную матрицу обеспечивает возможность надежной долговременной эксплуатации строительных конструкций. Качества железобетона в значительной степени зависят от свойств поверхностей сцепления арматуры с бетоном. В результате воздействия окружающей среды происходит коррозия железобетона, что при интенсивных нагрузках может привести к разрушению частей здания. Поэтому проблема обеспечения высоких прочностных качеств железобетона имеет большое значение для практики строительства. Одним из путей решения этой проблемы является оптимизация взаимодействия бетонной матрицы с упрочняющей арматурой.