DOI: 10.34220/ITRT2021_34-37

УДК 629.027

Прядкин В.И.

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой автомобилей и
сервиса ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, РФ

Шавырин К.А.

магистр кафедры автомобилей и
сервиса ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, РФ

Кольцов А.Ю.

магистр кафедры автомобилей и сервиса
ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, РФ

Pryadkin V.I.

Doctor of Technical Sciences,
Professor, Head of the Department of
Automobiles and Service,
Voronezh State Forestry
University named after
G.F. Morozov ", Voronezh, RF

Shavirin K.A.

post-graduate student of the
Department of Automobiles and
Service, Voronezh State Forestry
University named after
G.F. Morozov ", Voronezh, RF

Kolcov A.Yu.

post-graduate student of the
Department of Automobiles and
Service, Voronezh State Forestry
University named after
G.F. Morozov ", Voronezh, RF

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ШИРОКОПРОФИЛЬНЫХ ШИН ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ НА ДОРОЖНОЕ ПОКРЫТИЕ

MODELING THE IMPACT OF WIDE-PROFILE TRUCK TIRES ON THE ROAD SURFACE

Ключевые слова: широкопрофильная шина, дорожное покрытие, метод динамики частиц, моделирование, распределение давления.

Аннотация: в статье приведена математическая модель разрушающего воздействия широкопрофильной шины на дорожное полотно. Математическая модель позволяет достаточно адекватно воспроизводить воздействие широкопрофильной шины на дорожное покрытие с учетом нагрузки и параметров шины, а также структуры дорожного покрытия и температурного состояния.

Keywords: wide tire, road surface, particle dynamics method, modeling, pressure distribution.

Annotation: the article presents a mathematical model of the destructive effect of a wide-profile tire on the roadway. The mathematical model makes it possible to adequately reproduce the effect of a wide-profile tire on the road surface, taking into account the load and parameters of the tire, as well as the structure of the road surface and the temperature state.

С развитием автомобильной техники и системы автомобильных перевозок в последние годы важными темами стали высокая скорость и грузоподъем-

ность транспортных средств, а также взаимодействие между транспортным средством и дорожным покрытием.

Тяжелые коммерческие автомобили вызывают быстрый износ дорожного полотна. Влияние нагрузки грузового автомобиля на структуру дорожного покрытия характеризуется величиной и частотой приложенных нагрузок. Эти нагрузки передаются на дорожное покрытие через грузовые шины. Поэтому, правильное понимание взаимодействия между шинами и дорожными покрытиями необходимо для анализа возникающих напряжений и деформаций в дорожном покрытии. Дорожные условия оказывают существенное влияние на технико-эксплуатационные показатели работы автомобильного транспорта. Повреждение дорожного покрытия может происходить в результате воздействия окружающей среды, динамического характера приложения нагрузки на транспорт, конструктивных особенностей автомобилей. Поэтому во многих странах мира проводятся комплексные исследования по оценке характера взаимодействия шин грузовых автомобилей с дорожным полотном, чтобы охарактеризовать ущерб, нанесенный дорожному покрытию грузовыми автомобилями [1-4].

Одним из эффективных путей снижения динамической нагруженности опорного основания является применение широкопрофильных шин низкого давления. Широкопрофильные шины грузовых автомобилей имеют ряд преимуществ перед сдвоенными шинами, одним из которых является меньшее разрушающее воздействие на дорожное покрытие. Для детального исследования данного процесса целесообразно использовать математическое моделирование. Из существующих методов моделирования наибольшую эффективность для моделирования разрушения разнообразных сред имеют методы динамики частиц [4-8]. На основе данного метода разработана математическая модель воздействия широкопрофильной шины грузового автомобиля на дорожное покрытие.

В основу модели положен главенствующий в современной математике принцип, который заключается в замене макроскопических объектов объектами меньших размеров (желательно бесконечно малых размеров, или, по крайней мере, намного меньших размеров, чем характерный размер автодороги или колеса автомобиля) [9-12]. Моделирование производится в двумерном пространстве X - Y . при этом ось X – расположена в горизонтальном направлении поперек автодороги, а ось Y – в вертикальном направлении. Исключение третьего измерения позволяет при заданном числе элементов (в расчетах использовали до 10000 элементов) увеличить линейные размеры моделируемой системы в направлениях X и Y . Исключаемая ось Z была бы расположена в горизонтальном направлении вдоль автодороги, и поэтому вдоль данного направления практически не происходило бы сколь-нибудь значимых изменений в состоянии дорожного покрытия.

Кинематическое состояние каждого элемента дорожного покрытия i определяется четырьмя переменными: декартовыми координатами его центра (x_i, y_i) , м, и декартовыми составляющими скорости (v_{xi}, v_{yi}) , м/с.

Силы между элементами рассчитываются в приближении вязко-упругого взаимодействия:

$$F_{xij} = \begin{cases} c (d_{\varnothing} - r_{ij})(x_i - x_j)/r_{ij} + d(v_{xi} - v_{xj}), & \text{если } r_{ij} < \alpha d_{\varnothing}; \\ 0, & \text{если } r_{ij} \geq \alpha d_{\varnothing}; \end{cases} \quad (1)$$

$$F_{yij} = \begin{cases} c (d_{\varnothing} - r_{ij})(y_i - y_j)/r_{ij} + d(v_{yi} - v_{yj}), & \text{если } r_{ij} < \alpha d_{\varnothing}; \\ 0, & \text{если } r_{ij} \geq \alpha d_{\varnothing}, \end{cases}$$

Рисунок 1 – Представление в модели широкопрофильной шины и многослойного дорожного покрытия

где F_{xij} и F_{yij} – декартовы составляющие силы F_{ij} , Н; c – жесткость упругого взаимодействия элементов, Н/м; d – коэффициент вязкости (демпфирования) взаимодействия, Н·с/м; α – коэффициент ограничения взаимодействия, безразмерный.

Для моделирования разрушения дорожного покрытия в модели необходимо проследить эволюцию системы элементов, для этого рассчитываются траектории движения каждого из элементов. Траектории находятся при решении уравнений движения отдельных элементов, которые можно записать на основе второго закона Ньютона.

$$m_{\varnothing} \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^{N_{\varnothing}} (F_{xij}^V + F_{xij}^B) + k_v v_{xi}; \quad (2)$$

$$m_{\varnothing} \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^{N_{\varnothing}} (F_{yij}^V + F_{yij}^B) - m_{\varnothing} g + c_{\varnothing-\Pi} \cdot r_{vni} + k_v v_{yi},$$

где $m_{\varnothing}$ – масса элемента дорожного покрытия, кг; t – время, с; g – ускорение свободного падения м/с²; $c_{\varnothing-\Pi}$, Н/м, и k_v , Н·с/м, – коэффициенты жесткости и вязкости вязкоупругого взаимодействия i -го элемента с подстилающей поверхностью; r_{vni} – расстояние взаимного внедрения i -го элемента дорожного покрытия в подстилающую поверхность, м; v_{xi} и v_{yi} – декартовы составляющие вектора скорости i -го элемента, м/с.

Совокупность уравнений вида (2) для всех $N_{\varnothing}$ элементов и описывает эволюцию дорожного покрытия с течением времени. В начальный момент времени элементы дорожного покрытия случайным образом по равномерному закону размещаются в геометрической области – сечении автодороги. После начала интегрирования уравнений движения элементы, двигаясь, попадают в локальные положения равновесия. Таким образом, реализуется случайная плотная упаковка элементов. Сама модель автодороги при этом приходит в стабильное неподвижное состояние. Далее в модели имитируется воздействие автомобильных колес на верхний слой дорожного покрытия.

Численное интегрирование уравнений движения элементов осуществляется модифицированным методом Эйлера-Коши [4]. Данный метод имеет вто-

рой порядок точности по координате и первый порядок точности по скорости. Метод является универсальным, надежным, а также быстро программируемым. Метод реализуется следующими формулами.

$$\begin{aligned}x_i^{\tau+1} &= x_i^{\tau} + v_{xi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{xi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; \quad v_{xi}^{\tau+1} = v_{xi}^{\tau} + a_{xi}^{\tau} \cdot \Delta t; \\ y_i^{\tau+1} &= y_i^{\tau} + v_{yi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{yi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; \quad v_{yi}^{\tau+1} = v_{yi}^{\tau} + a_{yi}^{\tau} \cdot \Delta t,\end{aligned}\quad (3)$$

где i – номер элемента, τ и $\tau+1$ – индексы текущего и следующего временного шага; Δt – шаг интегрирования по времени, с; x_i^{τ} и y_i^{τ} – координаты i -го элемента, м; v_{xi}^{τ} и v_{yi}^{τ} – декартовы составляющие скорости i -го элемента, м/с; a_{xi}^{τ} и a_{yi}^{τ} – декартовы составляющие ускорения i -го элемента, м/с². Шаг интегрирования системы дифференциальных уравнений составлял $\Delta t = 0,0001$ с.

В разработанной модели воспроизводится многократный проезд автомобилей по рассматриваемому сечению автодороги. Каждый проезд заключается в двухкратном (для двухосных автомобилей), либо многократном (для многоосных автомобилей) прохождении колеса по сечению автодороги.

Таким образом, разработана достаточно адекватная модель воздействия широкопрофильной шины на дорожное покрытие, позволяющая изучить влияние параметров шины и дорожного покрытия на деформацию покрытия.

Список литературы

1. Расчетно-экспериментальная оценка технических характеристик шин грузовых автомобилей / З. А. Годжаев [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2015. № 5. С. 14-19.
2. Автомобильные шины, диски и ободья / В. Е. Евзович, П. Г. Райбман. – М. : Автополис – плюс, 2010. – 144 с.
3. Ishihara, K., Development of A Three-Dimensional Membrane Element for the Finite Element Analysis of Tires. Tire Science and Technology, 1991. 19 (1). – pp. 23-36.
4. Kao, B. and M. Muthukrishnan, Tire transient analysis with an explicit finite element program. Tire Science and Technology, 1997. 25 (4). – pp. 230-244.
5. Eichler, M. A ride comfort tyre model for vibration analysis in full vehicle simulations. Vehicle System Dynamics, 1997. 27 (S1). – pp. 109-122.
6. Прядкин, В. И. Шины сверхнизкого давления для сельскохозяйственных мобильных средств / В. И. Прядкин, С. В. Гончаренко. – Воронеж, 2016. – 240 с.
7. Транспортно-технологические средства на шинах сверхнизкого давления / В. И. Прядкин, В. Я. Шапиро, З. А. Годжаев, С. В. Гончаренко. – Воронеж, 2019. – 492 с.
8. Прядкин, В. И. Мобильные средства химизации грузоподъемностью 1-2 т на шинах сверхнизкого давления / В. И. Прядкин. – Воронеж, 2017. – 183 с.
9. Годжаев, З. А. Влияние давления в высокоэластичной шине на тяговые свойства колеса / З. А. Годжаев, А. Ю. Измайлов, В. И. Прядкин // Автомобильная промышленность, 2015, – № 2. – С. 9-12.
10. Прядкин, В. И. Энергосредство нового поколения / В. И. Прядкин // Техника в сельском хозяйстве. – 2012. – № 3. – С. 23-25.
11. Кривцов А. М., Кривцова Н. В. Метод частиц и его использование в механике деформируемого твердого тела // Дальневосточный математический журнал ДВО РАН. – 2002. – Т. 3. – № 2. – С. 254-276.
12. Давыдов М. Н., Кедринский В. К. Метод сглаженных частиц в задачах моделирования кавитационного разрушения жидкости при ударно-волновом нагружении // Прикладная механика и теоретическая физика. – 2013. – Т. 54. – № 6. – С. 17-26.