



РАЗРУШАЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ШИРОКОПРОФИЛЬНЫХ ШИН ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ НА КОНСТРУКЦИЮ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ

✉¹ **Прядкин Владимир Ильич**

д.т.н., зав. кафедрой машиностроительных технологий Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (РФ)
Vip16.vgltu@mail.ru

Артемов Артем Владимирович

аспирант кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, РФ

Колядин Павел Александрович

аспирант кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, РФ

Кольцов А. Ю.

аспирант кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, РФ

Аннотация. В статье проведена 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.

Ключевые слова: ШИРОКОПРОФИЛЬНАЯ ШИНА, ДОРОЖНОЕ ПОКРЫТИЕ, МЕТОД ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ.

DESTROYING EFFECTS OF TRUCK TIRES ON THE DESIGN OF ROADWEAR

✉¹ **Vladimir I. Pryadkin**

Doctor of Tech. Sc., Professor Head. Department of the Department of automobiles and Service, Voronezh State Forestry Engineering University of G.F. Morozov, Russian Federation (RF)
Vip16.vgltu@mail.ru

Artem V. Artemov

post-graduate student of department of the Department of automobiles and Service, Voronezh State Forestry Engineering University of G.F. Morozov, RF

Pavel A. Kolyadin

post-graduate student of department of the Department of automobiles and Service, Voronezh State Forestry Engineering University of G.F. Morozov, RF

A. Yu. Koltsov

post-graduate student of department of the Department of automobiles and Service, Voronezh State Forestry Engineering University of G.F. Morozov, RF

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.

Keywords: WIDE TIRE, ROAD SURFACE, PARTICLE DYNAMICS METHOD, MODELING, PRESSURE DISTRIBUTION.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Интенсивный режим эксплуатации дорог с покрытием приводит их к преждевременному износу. Повреждение дорожного покрытия происходит в результате воздействия окружающей среды, динамического характера приложения нагрузки на транспорт, конструктивных особенностей автомобилей и плохой стратегии технического обслуживания. Двумя основными проблемами, связанными с нагрузкой при эластичном состоянии дорожного покрытия, являются волнистость и усталостное растрескивание дорожного полотна [1, 2].

Усталостное растрескивание вызвано повторяющимися относительно тяжелыми нагрузками, которые обычно ниже прочности материала для дорожного покрытия. Усталостное растрескивание снизу вверх обычно начинается на дне асфальтовых слоев относительно тонких гибких покрытий (менее 150 мм) или на дне отдельного асфальтового слоя, если существуют плохие условия склеивания.

При движении по дорогам без покрытия грузовые автомобили оказывают существенное разрушающее воздействие на дорожное полотно и особенно находящееся во влажном состоянии. Тяжелые грузовые автомобили вызывают быстрый износ дорожной одежды. Влияние нагрузки грузового автомобиля на структуру дорожного покрытия контролируется величиной и частотой приложенных колесных 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.

Взаимодействие шин с дорожным покрытием имеет важное значение для проектирования дорожного покрытия, поскольку область отпечатка шины является единственной областью контакта между транспортным средством и дорожным покрытием, при котором фактическое распределение контактных напряжений передается на поверхность дорожного покрытия. Одним из эффективных путей снижения динамической нагруженности опорного основания является применение широкопрофильных шин низкого давления. Новое поколение шин с широким основанием (445 / 50R22.5 и 455 / 55R22.5) появилось на рынке в 2000-х годах, чтобы уменьшить повреждения дорожного покрытия и обеспечить другие преимущества в плане безопасности и экономии. Шины с широким основанием нового поколения на 15–18% шире, чем у первого поколения, и не требуют высокого давления в шинах из-за их особой конструкции стенок.

Целью работы является исследование воздействия широкопрофильных шин низкого давления на дорожную одежду от действия осевой нагрузки грузовых автомобилей. Объектом исследования являются процессы взаимодействия между дорожным покрытием и колесными движителями автомобиля Урал Next 55571-5121-74 оборудованного широкопрофильными шинами низкого давления 600/50 R22.5 и оборудованного ЦМК шинами 425/85R21.

2 Материалы и методы

В основу модели положен принцип, который заключается в замене макроскопических объектов объектами меньших размеров [2-5]. Слои дорожного покрытия представляются совокупностью большого числа отдельных круглых элементов (рис. 1) [6-8]. Используемый

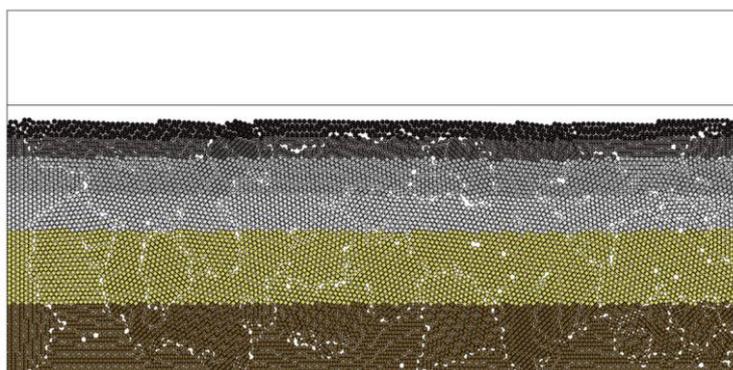


Рисунок 1 – Представление в модели многослойного дорожного покрытия

метод моделирования близок к SPH-методу (SmoothedParticleHydrodynamics) (метод сглаженных частиц), которые последние несколько лет применяется в компьютерной графике для получения высокореалистичного изображения различных сред, склонных к фрагментации [9-11]. Математическая модель динамики системы «шина – дорожное полотно» была разработана ранее и приведена в работе [2].

В модели воспроизводится многократный процесс воздействия широкопрофильных шин автомобиля на сечение автодорожного полотна. Каждый проезд заключается в многократном прохождении колеса одного борта по сечению автодороги (рис. 2).

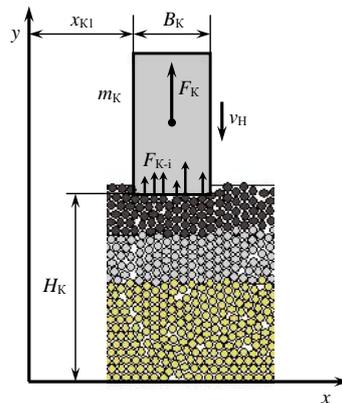


Рисунок 2– Схема по оценке сил взаимодействия широкопрофильных шин со слоями дорожного полотна

Процесс воздействия широкопрофильных шин описывается следующим образом [12-14]. В первый момент колесо располагается на некотором расстоянии от поверхности дороги, далее в определенный момент времени, в модели начинается движение колеса вниз с постоянной скоростью. Скорость нагружения зависит от скорости движения автомобиля, и связана с ней, в первом приближении, соотношением

$$v_H = v_A \cdot k_H / R_K, \quad (1)$$

где k_H – коэффициент, зависящий от типа и профиля колеса.

Проверка контакта i -го элемента дорожного покрытия с колесом осуществляется по задаваемой системой неравенств:

$$\begin{cases} x_i > x_K; \\ x_i < x_K + B_K; \\ y_i > H_K - d_{\text{э}}/2, \end{cases} \quad (2)$$

где H_K – текущее положение нижних точек колес, м.

Сила F_{K-i} , возникающая между контактирующими колесом и элементами дорожного покрытия, рассчитываются следующим образом:

$$F_{K-i} = c_{K\text{э}}(x_i - H_K + d_{\text{э}}/2) + d_{K\text{э}}(v_{yi} - v_H), \quad (3)$$

где $c_{K\text{э}}$, Н/м, и $d_{K\text{э}}$, Н·с/м – коэффициенты жесткости и вязкого трения.

Общая сила реакции на колесо F_{Kk} определяется суммированием отдельных сил F_{K-i} :

$$F_K = \sum_{i=1}^{N_{\text{э}}} \begin{cases} c_{K\text{э}}(x_i - H_k + d_{\text{э}}/2) + d_{K\text{э}}(v_{yi} - v_H), & \text{если } \begin{cases} x_i > x_K \\ x_i < x_K + B_K \\ y_i > H_K - d_{\text{э}}/2. \end{cases} \\ 0, & \text{если } \begin{cases} x_i < x_K + \\ x_i > x_K + B_K \\ y_i < H_K - d_{\text{э}}/2. \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

Для того, чтобы моделировать дорогу с неровной поверхностью (как изначальным уклоном дороги, так и образовавшимся рельефом в ходе разрушения), предусмотрено независимое движение вниз левого и правого колес. Каждое колесо движется вниз с постоянной скоростью до такой степени внедрения, при которой сила реакции F_K компенсирует вес $m_K \cdot g$ приходящийся на одно колесо (здесь m_K – масса автомобиля, приходящаяся на одно колесо, кг).

Для определения момента времени, в который необходимо сменить направление движения колеса на противоположное, на каждом шаге интегрирования сравниваются текущие высоты расположения колеса H_K с высотой $H_{исх}$, и текущие силу реакции на колесо F_K с весом автомобиля, приходящимся на одно колесо $m_K \cdot g$:

$$v_K = \begin{cases} v_H, & \text{если } \begin{cases} v_K < 0; \\ F_K > m_K g; \end{cases} \\ -v_H, & \text{если } \begin{cases} v_K > 0; \\ H_{K1} > H_{исх}; \end{cases} \\ v_K, & \text{если } \begin{cases} v_K < 0; \\ F_K < m_K g; \\ v_K > 0; \\ H_K < H_{исх}. \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

Здесь первое и второе условия представляют собой условия смены направления движения; третье – условие сохранения направления движения.

Нагружение колеса производится до тех пор, пока количество проездов автомобиля не достигнет заданного значения $N_{И}$, при этом количество проездов колеса $N_{П}$ определяется по количеству осей $N_{О}$ автомобиля, выбранного для испытаний: $N_{П} = N_{И} \cdot N_{О}$.

3 Результаты исследований

Разработанная модель воспроизводит движение отдельных элементов дорожного покрытия относительно друг друга, поэтому позволяет рассчитать целый ряд информативных характеристик процесса воздействия шины на дорожное покрытие. В частности, с помощью модели может быть рассчитано распределение давления в дорожном покрытии (рис. 3).

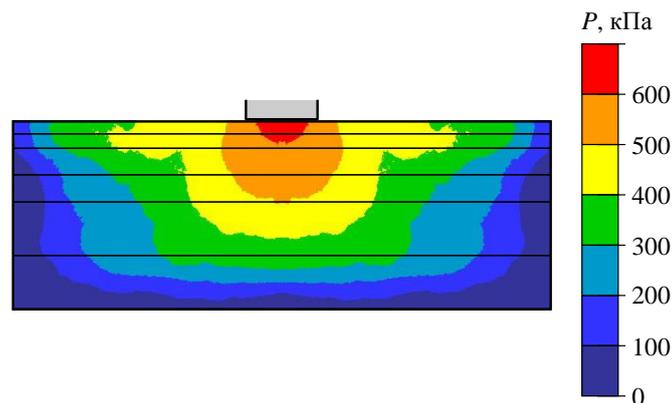


Рисунок 3 – Распределение давления по сечению дороги при воздействии шины шириной 425 мм с силой $F_K = 100$ кН и скоростью 10 м/с

Первым этапом предусматривалось исследование воздействия широкопрофильной шины на асфальтированную дорогу II категории при различных температурах покрытия. Температуру дороги варьировали на уровнях 0, 20, 40, 60 °С. Для шины шириной 425 мм при высокой температуре асфальта остается заметная колея (рис. 4, б). Тогда как для шины шириной 600 мм колея при 60 °С практически не заметна (рис. 5, б).

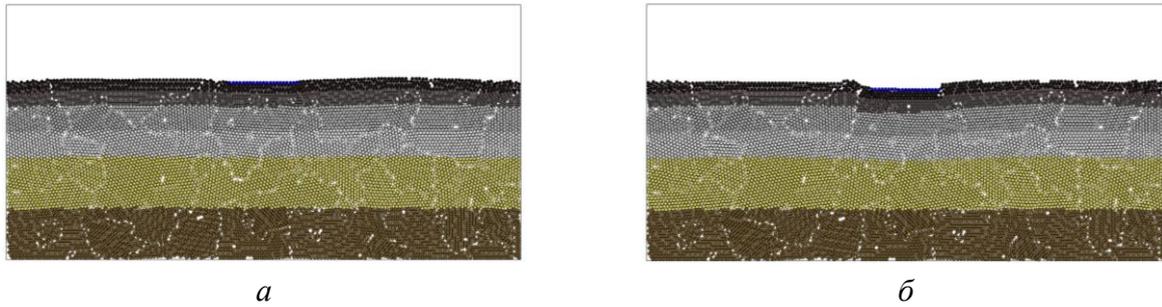


Рисунок 4 – Характер деформации дорожного покрытия после проезда шины шириной 425 мм с нагрузкой 100 кН при различных температурах: *a* – 20⁰С; *б* – 60⁰С

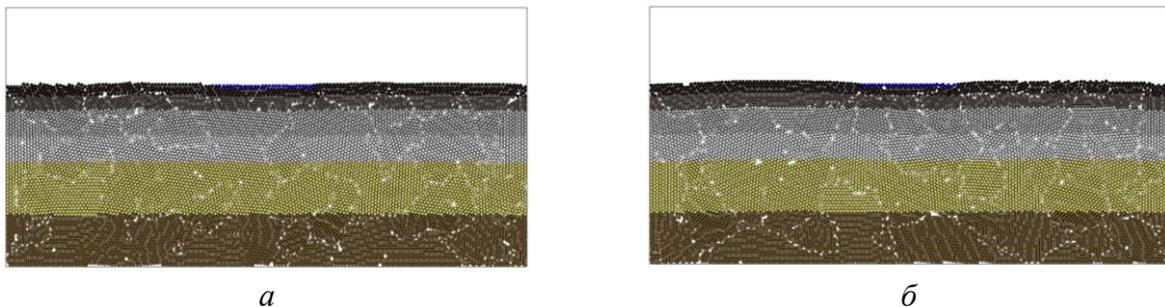


Рисунок 5 – Характер деформации дорожного покрытия после проезда шины шириной 600 мм с нагрузкой 100 кН при различных температурах: *a* – 20⁰С; *б* – 60⁰С

С увеличением температуры асфальта снижается вязкость асфальтового покрытия примерно по экспоненциальному закону: втрое на каждые 10⁰С. Поэтому глубина колеи зависит от температуры также, приблизительно экспоненциально (рисунок). Увеличение ширины шины с 425 до 600 мм приводит к непропорциональному уменьшению глубины колеи. При 60⁰С шина шириной 425 мм оставляет колею 11 мм, шина шириной 600 мм оставляет колею 6 мм.

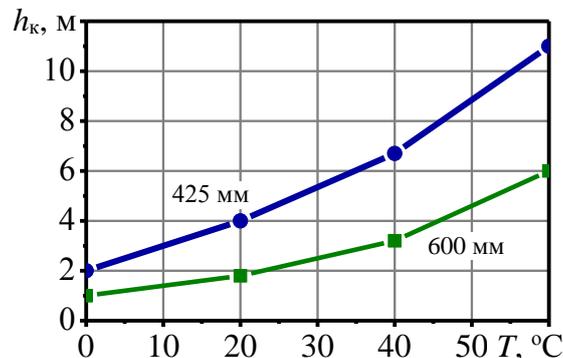


Рисунок 6 Влияние температуры асфальтовой дороги *T* на глубину колеи *h_к* для шин различной толщины (425 и 600 мм, указано у графиков)

Таким образом, использование шины шириной 600 мм вместо 425 мм позволяет снизить глубину колеи на разогретой до 60⁰С асфальтовой дороге с 11 до 6 мм.

Благодаря возможностям метода динамики частиц разработанная модель позволяет изучать процессы текучести грунтовой дороги при высокой влажности с образованием колеи глубиной до 0,4 м (дорожный просвет рассматриваемого грузового автомобиля) и более.

Вторым этапом предусматривалось исследование воздействия шин шириной 425 и 600 мм на поверхность грунтовой дороги с различной влажностью: от 20 до 60 %. Для каждого типа шин провели серию из пяти компьютерных экспериментов, в которых изменяли влажность поверхности грунтовой дороги от 20 до 60 % с шагом 10 %. Определяли как глубину

колеи после однократного проезда h_k , так и исследовали проезжаемость $N_{пр}$: количество проездов колес (по два - переднее, менее нагруженно, и заднее, полностью нагруженное), после которого глубина колеи превысит дорожный просвет автомобиля.

Сравнение профилей поверхности грунтовой дороги показывает, что шина шириной 600 мм оставляет колею примерно вдвое меньшей глубины, чем шина шириной 425 мм (рис. 7 и 8).

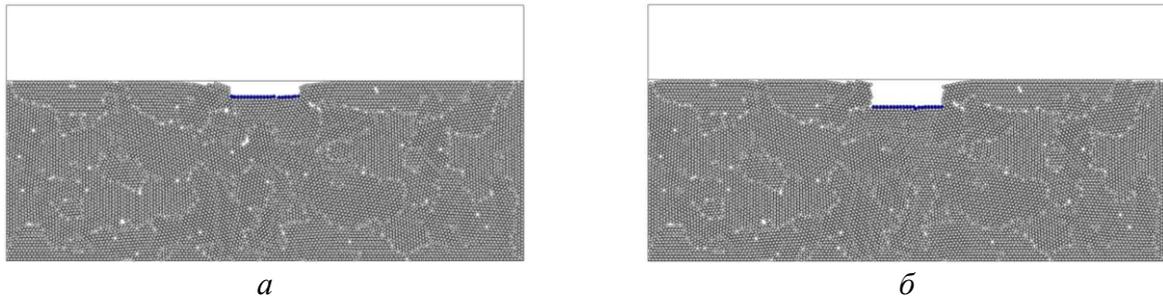


Рисунок 7 – Характер деформации поверхности грунтовой дороги после проезда шины шириной 425 мм с нагрузкой 100 кН при различной влажности покрытия: *a* – 20 %; *б* – 50 %

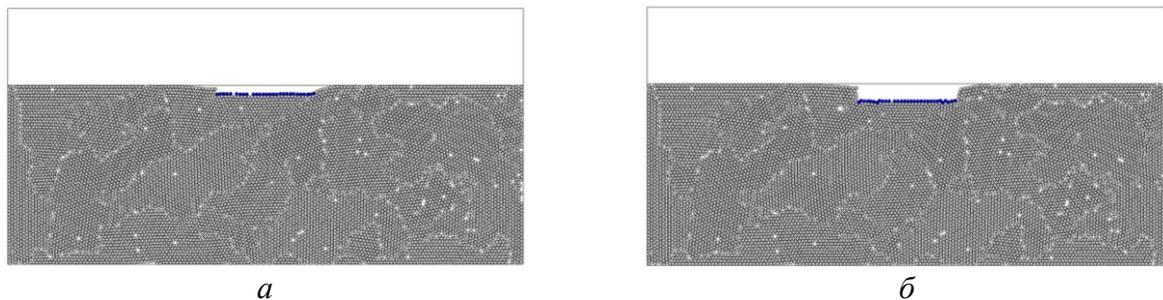


Рисунок 8 – Характер деформации поверхности грунтовой дороги после проезда шины шириной 600 мм с нагрузкой 100 кН при различной влажности покрытия: *a* – 20 %; *б* – 50 %

Проезжаемость грунтовых дорог автомобиля, оборудованного шинами шириной 425 (рис. 9), хуже чем шин шириной 60 мм (рис. 10).

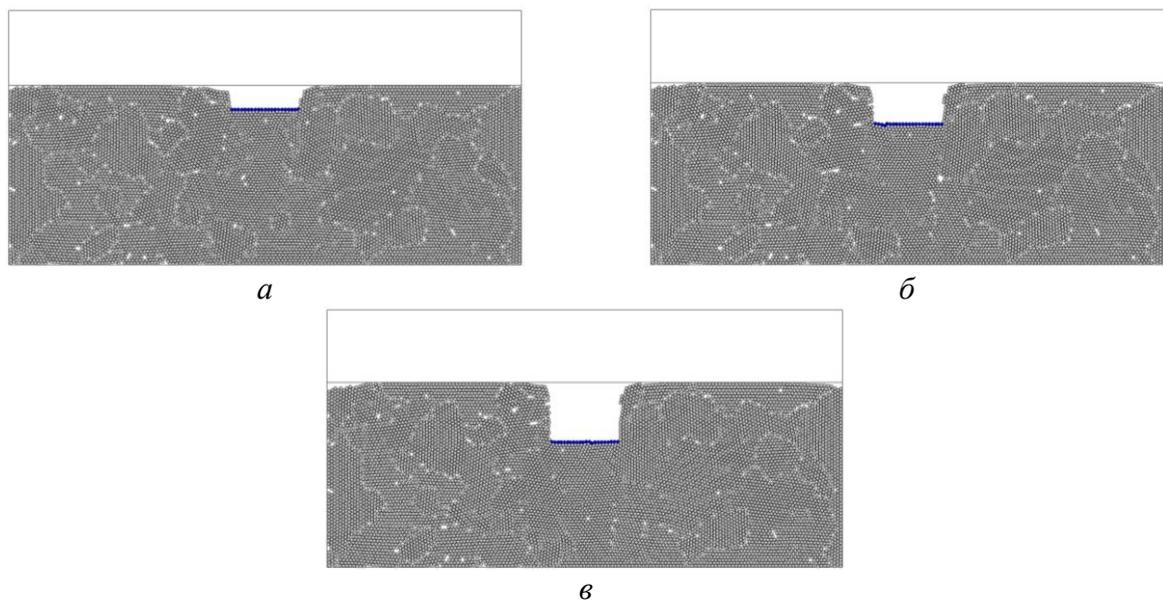


Рисунок 9 – Изменение профиля поверхности грунтовой дороги влажностью 20 % после многократного проезда шины шириной 425 мм с нагрузкой 100 кН:
a – 5 раз; *б* – 10 раз; *в* – 20 раз

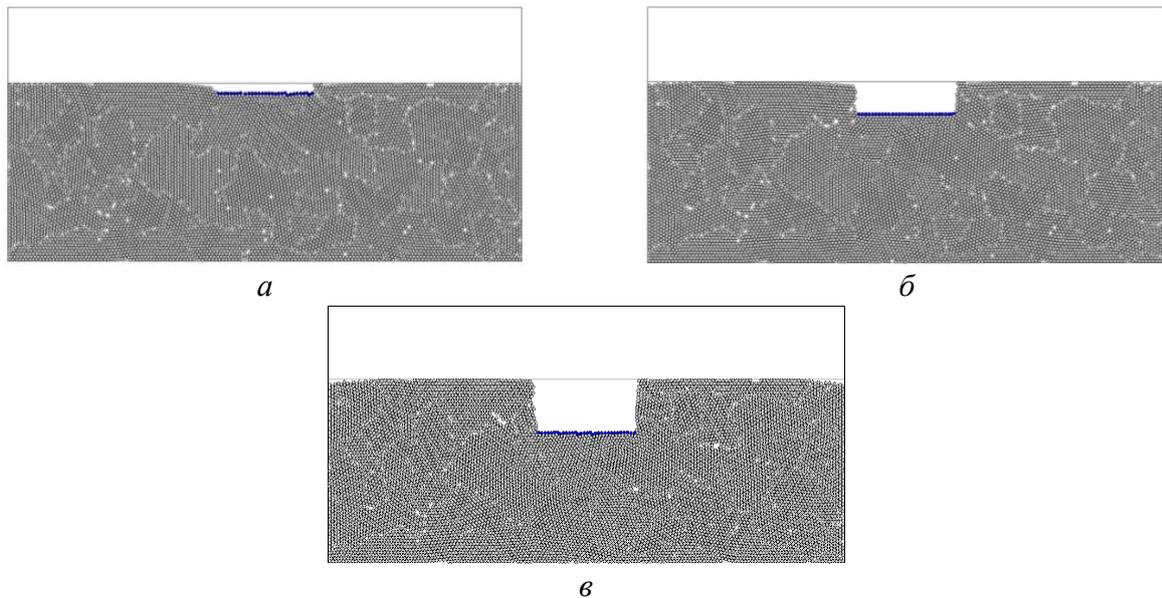


Рисунок 10 – Изменение профиля поверхности грунтовой дороги влажностью 20 % после многократного проезда шины шириной 600 мм с нагрузкой 100 кН: *a* – 5 раз; *б* – 25 раз; *в* – 50 раз

С увеличением влажности покрытия глубина колеи закономерно возрастает, приблизительно по экспоненциальному закону (рис. 11, *a*). При этом во всем диапазоне влажности для шины шириной 600 мм глубина колеи меньше в 1,4-1,6 раза, чем для шины шириной 425 мм. Проезжаемость шин существенно уменьшается с увеличением влажности поверхности дороги (рис. 11, *б*). Проезжаемость шин шириной 600 мм примерно в 2,5 раза выше, чем шин шириной 425 мм.

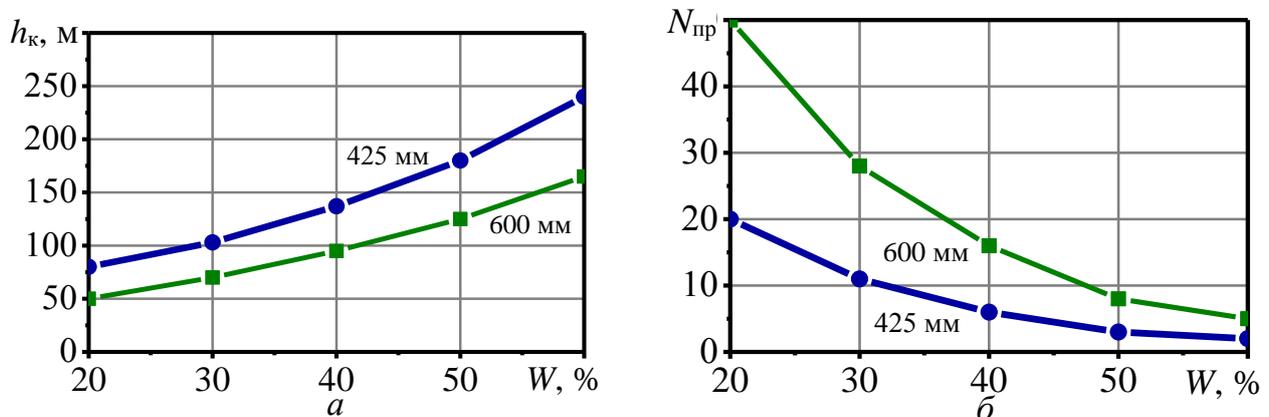


Рисунок 11 – Влияние влажности грунтовой дороги W на глубину колеи h_k (*a*) и проезжаемость $N_{пр}$ (*б*) для шин различной толщины (425 и 600 мм, указано у графиков)

С увеличением влажности покрытия глубина колеи закономерно возрастает, приблизительно по экспоненциальному закону (рис. 11, *a*). При этом во всем диапазоне влажности для шины шириной 600 мм глубина колеи меньше в 1,4...1,6 раза, чем для шины шириной 425 мм. Проезжаемость шин существенно уменьшается с увеличением влажности поверхности дороги (рис. 11, *б*). Проезжаемость шин шириной 600 мм примерно в 2,5 раза выше, чем шин шириной 425 мм.

Таким образом, на податливой опорной поверхности (высокая температура асфальтового покрытия или высокая влажность грунтовой дороги) шины шириной 600 мм по сравнению с шинами шириной 425 мм оставляют меньшую в 1,4-1,8 раз колею, а проезжаемость повышается примерно в 2,5 раза.

4 Обсуждение и заключение

1 Разработанная методика и программа для моделирования позволяют получить распределение давления и остаточной деформации в сечении дороги.

2 Использование шины шириной 600 мм вместо 425 мм позволяет снизить глубину колеи на разогретой до 60 °С асфальтовой дороге с 11 до 6 мм.

3 С увеличением влажности покрытия глубина колеи закономерно возрастает, приблизительно по экспоненциальному закону, при этом во всем диапазоне влажности для шины шириной 600 мм глубина колеи меньше в 1,4-1,6 раза, чем для шины шириной 425 мм.

4 Проезжаемость шин существенно уменьшается с увеличением влажности поверхности дороги. Проезжаемость шин шириной 600 мм примерно в 2,5 раза выше, чем шин шириной 425 мм.

5 На податливой опорной поверхности (высокая температура асфальтового покрытия или высокая влажность грунтовой дороги) шины шириной 600 мм по сравнению с шинами шириной 425 мм оставляют меньшую в 1,4-1,8 раз колею, а проезжаемость повышается примерно в 2,5 раза.

Список литературы

1 Немчинов М. В., Немчинов Д. М. Главная проблема дорожного строительства в России // Наука и техника в дор. отрасли. – 2001. – № 1. – С. 9-11.

2 Прядкин, В. И. Моделирование воздействия широкопрофильных шин грузовых автомобилей на дорожное покрытие / В. И. Прядкин, К. А. Шавырин, А. Ю. Кольцов // Инновационные технологии на автомобильном транспорте: материалы Всероссийской научно-технической конференции. Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. – Воронеж, 2021. – 34-37 с.

3 Годжаев З. А. и др. Расчетно-экспериментальная оценка технических характеристик шин грузовых автомобилей. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2015. № 5. С. 14-19.

4 Автомобильные шины, диски и ободья / В. Е. Евзович, П. Г. Райбман. – М. : Автополис – плюс, 2010. – 144 с.

5 Ishihara, K., Development of A Three-Dimensional Membrane Element for the Finite Element Analysis of Tires. Tire Science and Technology, 1991. 19(1) – p. 23-36.

6 Kao, B. and M. Muthukrishnan, Tire transient analysis with an explicit finite element program. Tire Science and Technology, 1997. 25(4) – p. 230-244.

7 Eichler, M., A ride comfort tyre model for vibration analysis in full vehicle simulations. VehicleSystemDynamics, 1997. 27(S1) – p. 109-122.

8 Прядкин В. И., Гончаренко С. В. Шины сверхнизкого давления для сельскохозяйственных мобильных средств / В. И. Прядкин, С. В. Гончаренко ; М-во обр. и науки РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2016. – 240 с.

9 Прядкин В. И. и др. Транспортно-технологические средства на шинах сверхнизкого давления / В. И. Прядкин, В. Я. Шапиро, З. А. Годжаев, С. В. Гончаренко ; М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2019. – 492 с.

10 Прядкин, В. И. Мобильные средства химизации грузоподъемностью 1-2 т на шинах сверхнизкого давления / В. И. Прядкин ; М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2017. – 183 с.

11 Годжаев З. А. и др. 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.

12 Прядкин, В. И. Энергосредство нового поколения / В. И. Прядкин // Техника в сельском хозяйстве. – 2012. – № 3. – С. 23-25.

13 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.

14 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.

References

1 Nemchinov M. V., Nemchinov D. M. Glavnaya problema dorozhnogo stroitel'stva v Rossii // Nauka i tekhnika v dor. otrasli. – 2001. – № 1. – S. 9-11.

2 Pryadkin, V. I. Modelirovanie vozdeystviya shirokoprofil'nyh shin gruzovyh avtomobilej na dorozhnoe pokrytie / V. I. Pryadkin, K. A. SHavyrin, A. YU. Kol'cov // Innovacionnye tekhnologii na avtomobil'nom transporte: materialy Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Voronezhskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet im. G.F. Morozova. – Voronezh, 2021. – 34-37 s.

3 Godzhaev Z. A. i dr. Raschetno-eksperimental'naya ocenka tekhnicheskikh harakteristik shin gruzovyh avtomobilej. Sel'skohozyajstvennyye mashiny i tekhnologii. 2015. № 5. S. 14-19.

4 Avtomobil'nye shiny, diski i obod'ya / V. E. Evzovich, P. G. Rajbman. – M. : Avtopollis – plyus, 2010. – 144 s.

5 Ishihara, K., Development of A Three-Dimensional Membrane Element for the Finite Element Analysis of Tires. Tire Science and Technology, 1991. 19(1) – p. 23-36.

6 Kao, B. and M. Muthukrishnan, Tire transient analysis with an explicit finite element program. Tire Science and Technology, 1997. 25(4) – p. 230-244.

7 Eichler, M., A ride comfort tyre model for vibration analysis in full vehicle simulations. VehicleSystemDynamics, 1997. 27(S1) – p. 109-122.

8 Pryadkin V. I., Goncharenko S. V. SHiny sverhnizkogo davleniya dlya sel'skohozyajstvennyh mobil'nyh sredstv / V. I. Pryadkin, S. V. Goncharenko ; M-vo obr. i nauki RF, FGBOU VO «VGLTU». – Voronezh, 2016. – 240 s.

9 Pryadkin V. I. i dr. Transportno-tekhnologicheskie sredstva na shinah sverhnizkogo davleniya / V. I. Pryadkin, V. YA. SHapiro, Z. A. Godzhaev, S. V. Goncharenko ; M-vo obrazovaniya i nauki RF, FGBOU VO «VGLTU». – Voronezh, 2019. – 492 s.

10 Pryadkin, V. I. Mobil'nye sredstva himizacii gruzopod"emnost'yu 1-2 t na shinah sverhnizkogo davleniya / V. I. Pryadkin ; M-vo obrazovaniya i nauki RF, FGBOU VO «VGLTU». – Voronezh, 2017. – 183 s.

11 Godzhaev Z. A. i dr. Vliyanie davleniya v vysokoelastichnoj shine na tyagovye svojstva koleasa / Z. A. Godzhaev, A. YU. Izmajlov, V. I. Pryadkin // avtomobil'naya promyshlennost', 2015, – № 2. – S. 9-12.

12 Pryadkin, V. I. Energosredstvo novogo pokoleniya / V. I. Pryadkin // Tekhnika v sel'skom hozyajstve. – 2012. – № 3. – S. 23-25.

13 Krivcov A. M., Krivcova N. V. Metod chastic i ego ispol'zovanie v mekhanike deformiruемого tverdogo tela // Dal'nevostochnyj matematicheskij zhurnal DVO RAN. – 2002. – Т. 3. – № 2. – S. 254-276.

14 Davydov M. N., Kedrinskij V. K. Metod sglazhennyh chastic v zadachah modelirovaniya kavitacionnogo razrusheniya zhidkosti pri udarno-volnovom nagruzhenii // Prikladnaya mekhanika i teoreticheskaya fizika. – 2013. – Т. 54. – № 6. – S. 17-26.

© Прядкин В. И., Артёмов А. В., Колядин П. А., Кольцов А. Ю., 2021