

УДК 629.113

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА В ШИНАХ НА ИХ НАГРУЗОЧНЫЙ РЕЖИМ

И. В. Балабин, проф., д. т. н. / И. С. Чабунин, доц., к. т. н. / А. С. Груздев, к. т. н.
Московский Государственный Машиностроительный Университет (МАМИ)

Колёсный узел является важнейшей составной частью транспортного средства, осуществляющей его связь с опорной поверхностью. Являясь одновременно элементом ходовой части, трансмиссии, систем управления, он влияет практически на все основные показатели автомобиля или трактора, включая такие важнейшие, как тягово-скоростные, топливно-экономические и тормозные, а также параметры устойчивости, управляемости, плавности хода и другие.

Колесо в сборе с пневматической шиной должно обладать минимальными массой, моментами инерции, сопротивлением качению и одновременно высокими сцепными качествами, упругими и демпфирующими характеристиками. Важным фактором, положительно влияющим на перечисленные требования, является то, что в качестве элемента, осуществляющего связь между шиной, непосредственно контактирующей с дорожной поверхностью, и колесом, выступает практически невесомый воздух, закачанный под значительным давлением в резинокордную оболочку — пневматическую шину — и создающий вокруг колеса силовое поле, способное воспринимать внешние нагрузки, возникающие при эксплуатации транспортного средства. При этом величина избыточного давления воздуха в шине должна быть строго определённой. Несоблюдение норм внутреннего давления воздуха отрицательно влияет практически на все основные эксплуатационные показатели мобильной машины и является одной из главных причин преждевременного разрушения шин. Правилами эксплуатации шин легковых автомобилей допускается отклонение давления воздуха от рекомендуемого на $\pm 0,01$ МПа, грузовых — на $\pm 0,02$ МПа.

Увеличение внутреннего давления воздуха в шинах по сравнению с рекомендуемыми величинами снижает сопротивление качению, уменьшает расход топлива, увеличивает выбег автомобиля. Но при этом уменьшается площадь контакта шины с опорной поверхностью (см. рис. 1), что приводит к повышению давления в средней части протектора и, как следствие, к усиленному его износу. На рис. 1 графически представлены зависимости площади, длины и ширины контакта шины 175/80 R16 на ровной

опорной поверхности (в значительной мере определяющие её сглаживающую способность) от величины избыточного давления воздуха при номинальной нагрузке. Как видно из рисунка, эти геометрические параметры контактирующей поверхности являются практически линейными функциями от внутреннего давления воздуха.

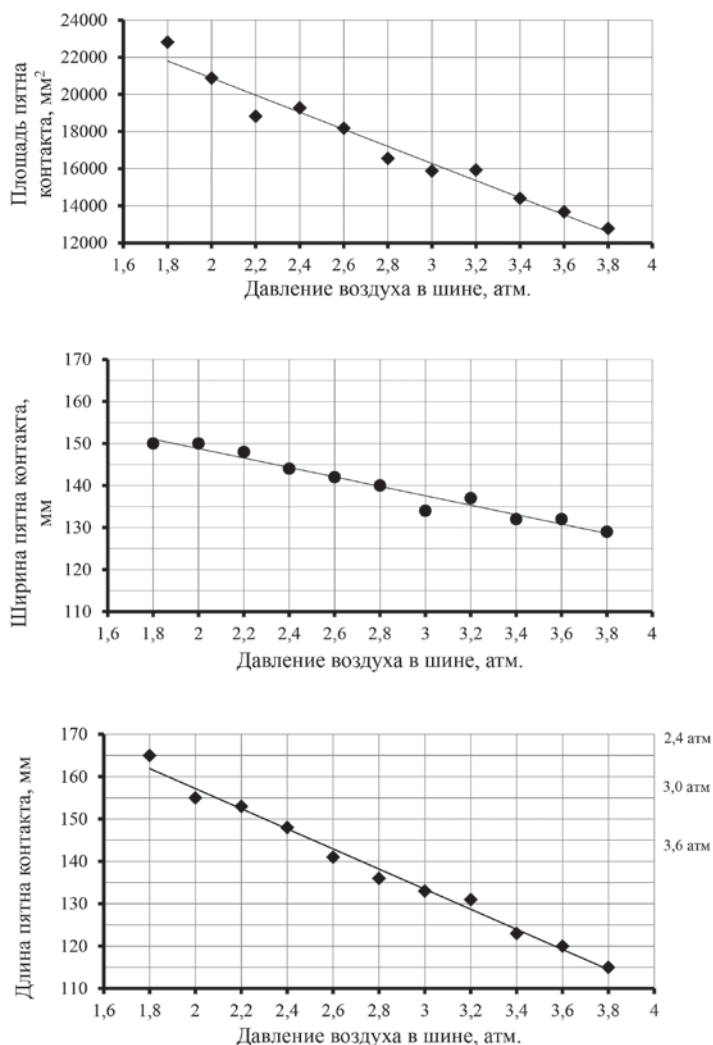


Рисунок 1. Зависимость площади, длины и ширины пятна контакта шины с ровной опорной поверхностью от внутреннего давления

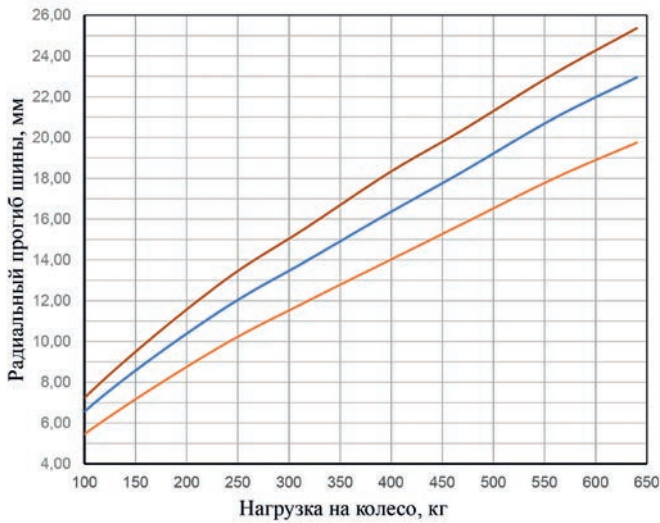


Рисунок 2. Зависимость радиального прогиба шины от нагрузки и внутреннего давления

Шины с повышенным давлением воздуха более склонны к проколам, порезам и разрывам; чаще пробуксовывают, что приводит к неравномерному ускоренному износу протектора на ведущих колёсах, за счёт уменьшения сцепных свойств шин возрастает тормозной путь, ухудшается курсовая устойчивость автомобиля. Все неровности дороги (особенно при движении на поворотах) сильными ударами передаются на детали рулевого управления, подвеску, подшипники ступиц колёс и кузов, способствуя самоотвинчиванию крепёжных соединений [2]. Кроме этого, увеличиваются напряжения в нитях корда каркаса и брекера не только от повышения давления воздуха в шине, но и от прироста динамических нагрузок вследствие увеличения жёсткости шины и уменьшения её сглаживающей способности. На рис. 2 приведены графики влияния величины внутреннего давления воздуха и радиальной нагрузки на прогиб шины, по которым определяется радиальная жёсткость как тангенс угла наклона касательной к графику. Приведённые на рис. 1 и 2 графики получены экспериментально с использованием стенда для определения прочностных характеристик элементов колёс [1].

Интерес представляет влияние избыточного давления воздуха в шинах на нагруженность и деформируемость шин в вертикальном направлении, напрямую влияющих на их прочность и долговечность. В качестве примера был выбран автомобиль с коэффициентом распределения подвесочных масс, равным единице, что позволяет рассматривать колебания передней и задней частей автомобиля независимо друг от друга. Задняя подвесочная масса принята равной $M = 2600$ кг, задняя неподвесочная масса $m = 200$ кг. Приведённые характеристики

подвески и амортизатора, которые использовались при расчёте, представлены на рис. 3. Расчётная схема задней части автомобиля, как наиболее нагруженной, представлена на рис. 4. Система дифференциальных уравнений, описывающих колебания в вертикальной плоскости, имеет вид

$$\begin{cases} M\ddot{y} + c_n(y - \xi) + \mu_n(\dot{y} - \dot{\xi}) + tr_p \cdot \text{sign}(\dot{y} - \dot{\xi}) = 0 \\ m\ddot{\xi} + c_u(\xi + q(t)) = 0, \end{cases}$$

где M — подвесочная масса, приведённая к задней подвеске; m — неподвесочная масса; c_n — вертикальная жёсткость подвески; c_u — вертикальная жёсткость шин; y — вертикальные перемещения центра масс задней подвесочной части; ξ — вертикальные перемещения центра масс задней неподвесочной части; μ_p — коэффициент сопротивления амортизаторов; tr_p — сила трения в продольном направлении в подвеске; $q(t)$ — ордината сглаженного шиной микропрофиля дороги.

Следует отметить, что приведённая система уравнений является приближённой, так как не учитывается, например, влияние на жёсткость силового воздействия на шину в осевом направлении, присутствующее всегда, даже при движении по, казалось бы, идеально ровной асфальтированной или цементно-бетонной дороге [2, 3], влияние изменяющейся ширины площадки контактирования шины с опорной поверхностью и т. д. Кроме того, возможно возникновение осевых сил, обусловленных наклоном микропрофиля дорожной поверхности в поперечном

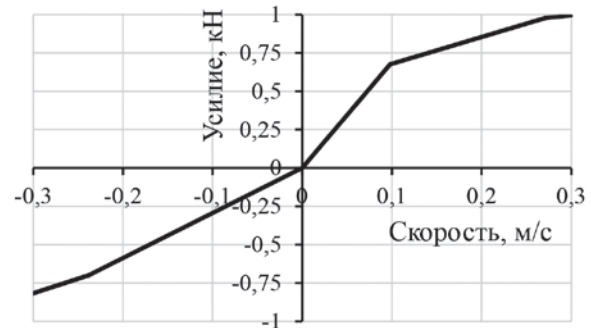
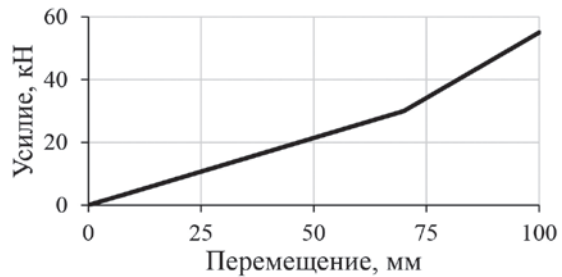


Рисунок 3. Приведённая характеристика задних рессор (а) и амортизаторов (б)

направлении [4]. Поэтому данная система уравнений может применяться только при прямолинейном движении с постоянной скоростью по дороге с относительно ровным твёрдым покрытием.

Моделирование случайного микропрофиля дорожной поверхности проводилось методом формирующего фильтра [6, 7]. Для этого использовались выражения для спектральных плотностей асфальтового

$$\tilde{S}_q(\theta) = 2 \cdot \sigma_q^2 \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \left(A_1 \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_1^2 + \theta^2} + A_2 \cdot \frac{\alpha_2^2 + \beta^2 + \theta^2}{(\theta^2 - \alpha_2^2 - \beta^2)^2 + 4\alpha_2^2\theta^2} \right)$$

и ровного булыжного

$$\tilde{S}_q(\theta) = 2 \cdot \sigma_q^2 \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\alpha_3}{(\alpha_3^2 + \theta^2)}$$

покрытий. В этих формулах θ — путевая частота ($\theta = 2\pi/s$, где s — длина неровности); $\tilde{S}_q(\theta)$ — спектральная плотность только для положительных частот; A_1, A_2 — весовые коэффициенты ($A_1 + A_2 = 1$); α_i — параметры, характеризующие быстроту затухания корреляционной связи ординат микропрофиля; β_i — параметры, характеризующие гармоническую составляющую микропрофиля; σ_q^2 — дисперсия. Для асфальтового покрытия $A_1 = 0,85, A_2 = 0,15, \alpha_1 = 0,2 \text{ м}^{-1}, \alpha_2 = 0,05 \text{ м}^{-1}, \beta = 0,6 \text{ м}^{-1}, \sigma_q = 0,08 \text{ м}$, а для ровного булыжного $\alpha_3 = 0,45 \text{ м}^{-1} - \sigma_q = 0,014 \text{ м}$ [5].

На рис. 5 приведены кривые, полученные численным методом и иллюстрирующие влияние избыточного давления воздуха в шинах на величину среднеквадратических отклонений (СКО) динамических вертикальных нагрузок при движении автомобиля по асфальтированной (рис. 5а) и ровной булыжной (рис. 5б) дорогам с различными скоростями.

Как видно из приведённых графиков, зависимость СКО нагрузок от скорости движения автомобиля по ровной асфальтированной дороге является нелинейной вследствие того, что в микропрофиле присутствует гармоническая составляющая β . Величина максимального прироста сил наблюдается при скорости до 70 км/ч. Затем нагрузки несколько сни-

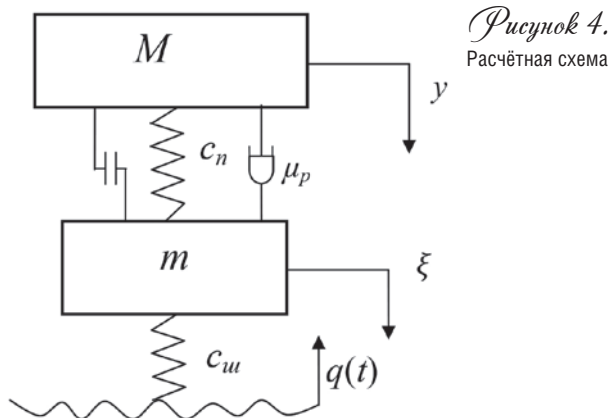


Рисунок 4.
Расчётная схема

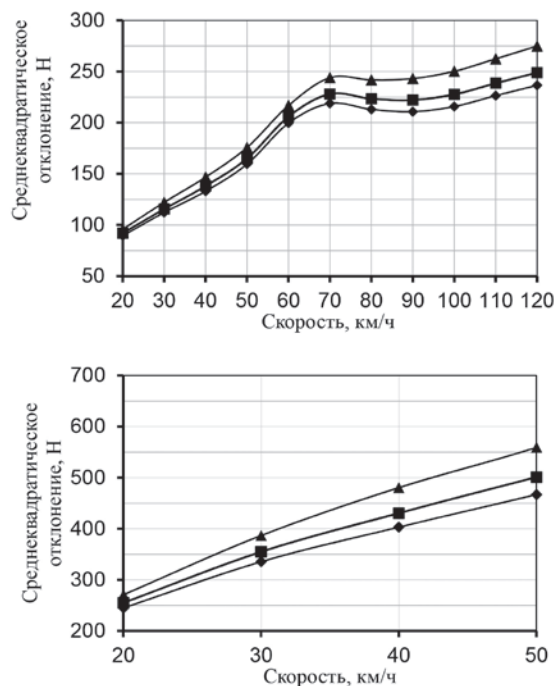


Рисунок 5. Зависимость среднеквадратических отклонений динамических нагрузок от скорости движения автомобиля по: а) асфальтированной дороге, б) булыжной дороге. Давление в шине: ◆ 2,4 атм.; ■ 3,0 атм.; ▲ 3,6 атм.

жаются и вновь начинают возрастать при скорости транспортного средства порядка 90 км/ч. Таким образом, при движении со скоростью порядка 70 км/ч по ровной асфальтированной дороге с номинальным внутренним давлением воздуха в шинах динамические вертикальные нагрузки на шины со стороны дорожного покрытия могут достигать 50 % (правило трёх сигм) от величины статической нагрузки, а при увеличении скорости свыше 100 км/ч прирост нагрузок превысит эту величину. При движении со скоростью свыше 65 км/ч увеличение давления воздуха в шинах на 20 % от номинального значения приводит к увеличению СКО нагрузок на 6,5–10 %.

Кривые, характеризующие среднеквадратические отклонения максимальных деформаций шин в вертикальном направлении, имеют качественно такой же характер, что и для нагрузок, с той лишь разницей, что увеличение давления воздуха в шинах приводит не к увеличению, а к снижению СКО (см. рис. 6). Максимальный прирост деформаций наблюдается также при скорости порядка 70 км/ч. При увеличении давления на 20 % его СКО уменьшится на 6,6 % и составит 3,11 мм. Следовательно, при качении колеса с пневматической шиной при скорости автомобиля 70 км/ч прогиб шины при номинальном внутреннем давлении может меняться при каждом обороте колеса от 0 до 33,8 мм, а при повышенном на 20 % давлении — от 0 до 29,8 мм.

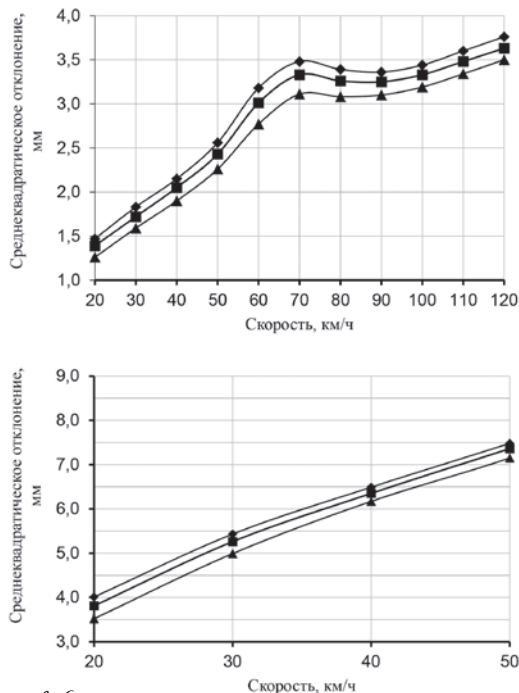


Рисунок 6. Зависимость среднеквадратических отклонений максимальной деформации шин от скорости движения автомобиля по: а) асфальтированной дороге, б) булыжной дороге. Давление в шине: ◆ 2,4 атм.; ■ 3,0 атм.; ▲ 3,6 атм.

При движении по ровной булыжной дороге при номинальном давлении воздуха в шинах и при повышенном на 20 % среднеквадратические отклонения нагрузок и максимальных прогибов увеличиваются практически прямо пропорционально скорости движения автомобиля. Графики ограничиваются скоростью 50 км/ч, так как при большей скорости возможен отрыв колеса от дороги и его перегрузка более чем на 100 %. При движении автомобиля со скоростью 40–50 км/ч прирост СКО динамических нагрузок составляет порядка 11,5 %, а снижение СКО максимальных прогибов — всего 2,5–3 % по сравнению со среднеквадратическими отклонениями этих параметров при движении с номинальным давлением. При номинальном внутреннем давлении прогиб шины в вертикальном направлении применительно к различным оборотам колеса может меняться от 0 до 45,9 мм (при 50 км/ч), при повышенном на 20 % давлении — от 0 до 42 мм.

Как известно, снижение относительно нормы внутреннего давления воздуха по сравнению с рекомендуемыми величинами приводит к снижению растягивающих напряжений в нитях каркаса и брекера. Но одновременно с этим увеличиваются изгибные деформации элементов шины, которые более опасны, особенно при циклическом характере их изменения. Поэтому работоспособность шины также значительно ухудшается. Например, при движении

по асфальтированной дороге со скоростью 70 км/ч прогиб шины может меняться от 0 до 34,3 мм, а при движении по ровной булыжной дороге со скоростью 50 км/ч — от 0 до 48,8 мм. Необходимо учитывать также, что увеличение циклических деформаций приводит к повышенному нагреву каркаса, что вызывает уменьшение прочности связей между отдельными её элементами. Это может привести к расслоению каркаса, отслоению протектора или боковин, отслоению брекера от каркаса, расслоению между слоями брекера. Как видно из рис. 1, ширина контактирующей поверхности шины с опорной поверхностью увеличивается, что снимает часть нагрузки в центре беговой дорожки и концентрирует её в основном в крайних зонах, что также нежелательно, так как это способствует более интенсивному износу плечевых зон протектора и ускоренному исчерпанию ресурса шины. Уменьшение же СКО нагрузок при движении по асфальтированной и ровной булыжной дорогам составит 4 и 6,8 % соответственно.

Обобщая изложенные соображения, можно сделать вывод, что при повышенном давлении возрастает динамическое воздействие между неподрессоренной и поддрессоренной частями, а пониженное давление приведёт к увеличению сопротивления качению и, как следствие, к повышенному расходу топлива, что говорит о чрезвычайной важности поддержания внутреннего давления воздуха в шине в пределах установленных норм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Балабин И. В., Груздев А. С., Лукьянов М. Н., Чабунин И. С. Стенд для определения прочностных характеристик элементов колёс // Известия МГТУ «МАМИ». — 2012. — № 2 (14). — Т. 1. — С. 367–369.
2. Балабин И. В., Путин В. А., Чабунин И. С. Автомобильные и тракторные колёса и шины: монография. — МГТУ «МАМИ», 2012. — 920 с.
3. Балабин И. В., Чабунин И. С. Автомобильные и тракторные колёса: учебное пособие. — МГТУ «МАМИ», 2010. — 445 с.
4. Балабин И. В., Чабунин И. С., Морозов С. А. Влияние осевой силы от радиальной при движении автомобиля по неровной дороге // Журнал автомобильных инженеров. — 2013. — № 2 (79). — С. 30–32.
5. Тарасик В. П. Теория движения автомобиля: учебник для вузов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006. — 478 с.
6. Чабунин И. С. Моделирование случайного микропрофиля дорожной поверхности методом формирующего фильтра. — Известия МГТУ «МАМИ». — 2013. — № 1 (15). — Т. 1. — С. 218–225.
7. Чабунин И. С., Щербаков В. И. Применение метода спектральных представлений для решения задач статистической динамики автомобиля // Журнал автомобильных инженеров. — № 4 (81). — С. 28–32.