

Зависимости вертикальной деформации пневматических шин

© В.В. Ларин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлен анализ широко используемых зависимостей вертикальной деформации пневматических шин от вертикальной нагрузки и давления воздуха в шине, отмечены их достоинства и недостатки. Предложены пути повышения точности рассматриваемых зависимостей.

Ключевые слова: транспортное средство, опорная поверхность, эластичный колесный движитель, пневматическая шина, вертикальная деформация, вертикальная нагрузка, давление воздуха.

При расчете параметров подвижности колесных транспортных средств (КТС) необходимо иметь достаточно надежные зависимости, описывающие изменение основных кинематических и силовых параметров катящегося колесного движителя (КД). Одним из таких параметров является нормальная деформация h_z под действием нормальной нагрузки P_z .

При движении по твердой опорной поверхности (ОП) внутреннее давление воздуха в шине p_w достаточно велико и, как правило, в процессе движения КТС является постоянным. Деформация шины происходит при изменении нормальной нагрузки, т. е. является функцией одного параметра. Погрешности расчета h_z приводят к неточностям вычисления реакций (нормальной, продольной и боковой) в контакте с ОП, сопротивления качению, нагрузок в трансмиссии и скорости движения.

При движении по местности, на которой характеристики ОП изменяются в широком диапазоне, для повышения подвижности и эффективности давление воздуха в шине p_w принудительно изменяют в достаточно большом диапазоне (в 4–8 раз). Естественно изменяется и нормальная деформация шины h_z . Кроме параметров, упомянутых при движении по твердой ОП, изменяются параметры контакта двух деформируемых объектов — шины и грунта. Погрешности расчета параметров взаимодействия становятся более весомыми, поскольку значительно возрастает загруженность узлов самого КТС, завышаются деформации при потере несущей способности грунтового основания, приводящие к снижению подвижности

КТС в результате его застревания (недостаточная сила тяги) или его «вывешивания».

Накоплен большой объем экспериментальных данных по деформируемости пневматических КД, на основе которых предложены выражения для расчета нормальной деформации h_z в зависимости от конструктивных и эксплуатационных параметров. Существуют достаточно сложные соотношения, полученные путем упрощения точных методик расчета пневматических шин, и более простые чисто эмпирические. При расчете параметров подвижности КТС желательно иметь достаточно простые и точные зависимости.

Проведенный анализ существующих в литературе выражений для расчета нормальной деформации h_z показал, что они не обеспечивают необходимую точность при изменении эксплуатационных параметров — нормальной нагрузки P_z и давления воздуха p_w .

Самая простая линейная зависимость $h_z = P_z / c_{шз}$ является достаточно приближенной (рис. 1) и для оценки параметров подвижности КТС на местности с широким диапазоном изменения параметров большинством исследователей применяется крайне редко.

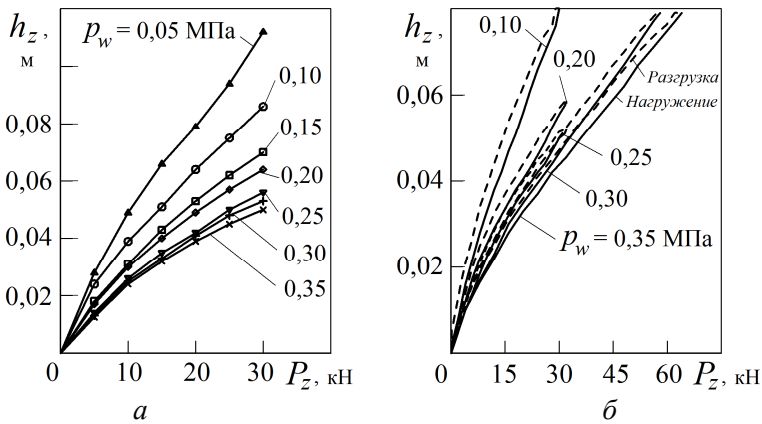


Рис. 1. Экспериментальные характеристики нормального обжатия шин 1200×500-508 мод. И-247 (а) и 1300×530-533 мод. ВИ-3 (б)

Наибольшее распространение получили следующие эмпирические выражения:

1) формула Агейкина [1], используемая при расчете параметров проходимости КД на деформируемых ОП и выражающая связь вертикальных деформаций h_z и нормальной нагрузки P_z через среднее давление в пятне контакта \bar{p}_z и площадь контакта $F_{ш}$:

$$P_z = \bar{p}_z F_{ш} \cdot 10^6, \quad (1)$$

где P_z — нормальная нагрузка, Н; \bar{p}_z — среднее давление в контакте колеса с ОП, МПа:

$$\bar{p}_z = 0,5c'_{ш}(p_w + p_{ш0}) \frac{\pi h_z}{b_{б.д}} \left(1 - \frac{h_z}{b_{б.д}} \right); c'_{ш} = \frac{B_{ш}}{H_{ш}} + \frac{1,5H_{ш}}{B_{ш}},$$

$F_{ш}$ — площадь контакта, м²; $B_{ш}$, $H_{ш}$ — ширина и высота профиля шины, м; $b_{б.д}$ — ширина беговой дорожки шины, м; p_w — давление воздуха в шине, МПа; $p_{ш0}$ — давление шины на ОП при $p_w = 0$, МПа; h_z — вертикальное перемещение оси колеса, м;

2) формула, предложенная в НАМИ [2]:

$$h_z = \frac{k_z(0,1P_z)^{3/4}}{1 + 10p_w}, \quad (2)$$

где k_z — коэффициент, постоянный для данной шины, м·МПа/Н^{3/4};

3) формула, полученная в НИИШП [3]:

$$h_z = A_1 + \left(A_1^2 + \frac{C_1 P_z}{1000} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

где $A_1 = \frac{0,5C_2 P_z \cdot 10^6}{p_w + p'_{ш0}}$; C_1 , C_2 — коэффициенты, м²/Н и м⁻¹ соответственно.

Для повышения точности расчетов формулу (2) предлагается записывать в виде

$$h_z = \frac{k'_z(0,1P_z)^{3/4}}{1 + 10p_w} \sqrt{\frac{p_{w \text{ ном}} + p_w}{4p_{w \text{ ном}}}}, \quad (4)$$

где $p_{w \text{ ном}}$ — номинальное (экспериментальное) давление воздуха в шине, причем выражение (4) дает приемлемую точность во всех диапазонах изменения P_z и p_w .

Определим неизвестные коэффициенты в формулах методом наименьшей суммы квадратов разностей расчетных и экспериментальных значений $h_z = f(p_w, P_z)$ при постоянных значениях p_w . Анализ расчетов показывает достаточно точное (< 5 %) совпадение расчетных и экспериментальных значений h_z во всем диапазоне P_z . Исключением является формула (1), расчет по которой для некоторых типов шин дал завышенные (> 30 %) значения h_z при $P_z \leq 0,25P_{z \text{ ном}}$, где $P_{z \text{ ном}}$ — номинальная нормальная нагрузка.

Однако коэффициенты, полученные при различных значениях p_w для одного и того же диапазона P_z и одной и той же шины, отличаются, что указывает на возможные ошибки при использовании данных зависимостей при постоянных (средних) значениях коэффициентов и изменяемом давлении воздуха в шине.

На рис. 2 представлены относительные погрешности расчета нормальной деформации шины $\tilde{h}_z \text{ расч} = (h_z \text{ экс} - h_z \text{ расч}) / h_z \text{ экс}$ при различных значениях P_z и p_w . В качестве базовых при расчете приняты средние значения параметров, полученные вышеупомянутым методом при фиксированных значениях p_w .

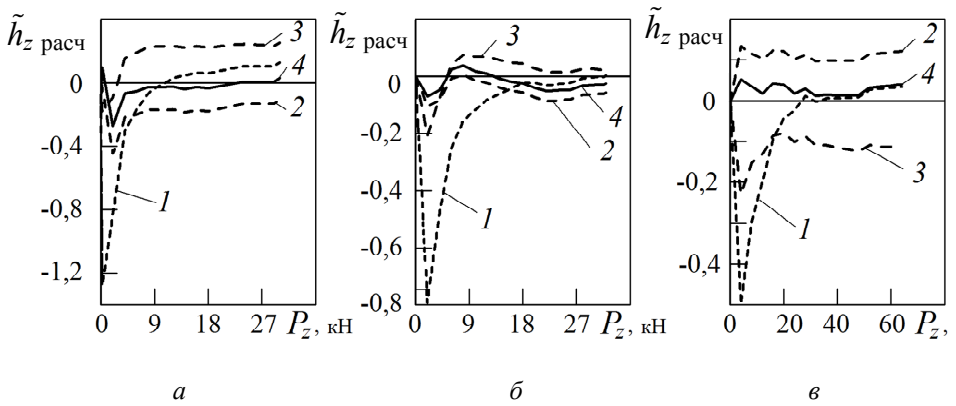


Рис. 2. Относительные погрешности расчета нормальной деформации шины 1300×530-533 мод. ВИ-3 при $p_w = 0,1$ (а), $0,2$ (б) и $0,35$ МПа:

1–4 — расчет по формулам (1)–(4) соответственно

Видно, что расчет по формулам (2) и (3) при постоянных значениях p_w дает точные результаты, тогда как при отклонении давления от среднего значения (особенно при больших диапазонах изменения p_w , см. рис. 2, а) погрешности превышают 20 %.

Формула (1) обеспечивает более стабильные результаты в широком диапазоне изменения p_w (в основном диапазоне нагрузок относительная погрешность не превышает 4...8 %). Для ряда шин при малых нагрузках наблюдается отмеченное выше значительное возрастание погрешности (см. рис. 2).

Основной причиной возникновения ошибок при изменении давления воздуха является изменение значений $p_{ш0}$ и k_z .

Наиболее точно удовлетворяют изменению P_z и p_w значения параметров, представленные в таблице.

Значения параметров в формулах (1)–(4)

Шина	p_w ном, МПа	$p_{ш0}$, МПа	$\frac{k_z \cdot 10^4, \text{ м} \cdot \text{МПа}}{\text{Н}^{3/4}}$	$p'_{ш0}$, МПа	$C_1 \cdot 10^5, \text{ м}^2 / \text{Н}$	$C_2, \text{ м}^{-1}$	$\frac{k'_z \cdot 10^4, \text{ м} \cdot \text{МПа}}{\text{Н}^{3/4}}$
1200×500-508 мод. И-247	0,35	0,1242	4,84	0,402	4,07	1,0284	7,66
1260×425-533 мод. Кама-1260	0,40	0,0453	6,28	0,028	4,20	0,5000	10,5
14.00-20 мод. ОИ-25	0,37	0,1480	4,98	0,550	2,87	1,5000	7,50
1300×530-533 мод. ВИ-3	0,35	0,1770	4,36	0,457	2,42	0,8912	6,74
16.00-20 мод. И-159	0,32	0,0695	5,16	0,477	1,54	1,4040	8,39
1600×600-685 мод. В-178	0,40	0,3685	3,90	1,729	0,89	1,5000	5,50

Кроме обеспечения необходимой точности при расчете h_z в основном диапазоне рабочих нагрузок P_z зависимости не должны искажать физического процесса нагружения шины — с увеличением относительной деформации $\tilde{h}_{z \text{ п}} = h_z / H_{\text{ш}}$ профиля шины нормальная нагрузка P_z должна возрастать и при $\tilde{h}_{z \text{ п}} \approx 1$ увеличиваться в несколько раз по сравнению с $P_{z \text{ ном}}$. Это необходимо при решении задач о распределении реакций многоосных КТС, движущихся на подъемах, спусках, больших неровностях, при выборе хода подвески, особенно при решении системы нелинейных уравнений на ЭВМ с большим шагом итераций.

Преобразуем выражения (2)–(4) относительно P_z (формула (1)) непосредственно определяет P_z в зависимости от h_z):

$$P_z = 10 \left[\frac{h_z (1 + 10 p_w)}{k_z} \right]^{3/4}; \quad (5)$$

$$P_z = \frac{h_z^2}{A_2}, \quad A_2 = 0,001 C_1 + \frac{h_z C_2 \cdot 10^{-6}}{p_w + p'_{ш0}}; \quad (6)$$

$$P_z = 10A_3^{4/3}, \quad A_3 = h_z(1 + 10p_w) / k'_z \sqrt{\frac{p_{w \text{ ном}} + p_w}{4p_{w \text{ ном}}}}. \quad (7)$$

Для шины 1200×500-508 мод. И-247 с $p_w = 0,05$ МПа зависимости, рассчитанные по этим формулам, приведены на рис. 3, а.

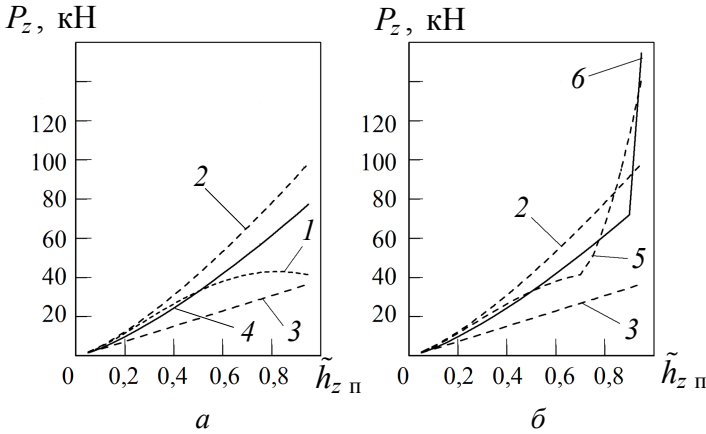


Рис. 3. Изменение характеристик шины 1200×500-508 мод. И-247 при $p_w = 0,05$ МПа без (а) и с корректировкой (б), обеспечивающей резкое возрастание нагрузки P_z :

1–4 — расчет по формулам (1), (5), (6), (7), (9) и (10) соответственно

Недостатком формулы (1) является уменьшение нагрузки P_z при больших значениях относительного прогиба \tilde{h}_z п, что противоречит физике процесса нагружения (см. рис. 3, а). По логике при больших относительных деформациях \tilde{h}_z п значение P_z должно также возрастать.

Для устранения этого недостатка предлагается до точки перегиба определять среднее давление по формуле (1), а за ней по зависимости

$$\bar{p}_z = \bar{p}_z \text{ пер} \left(\tilde{h}_z \text{ п} / \tilde{h}_z \text{ п пер} \right)^4, \quad (8)$$

где \tilde{h}_z п пер, \bar{p}_z пер — относительная деформация и давление, соответствующие точке перегиба:

$$\tilde{h}_z \text{ п пер} = 0,5; \quad \bar{p}_z \text{ пер} = 0,5c'_{ш} (p_w + p_{ш0}) \frac{\pi h_z \text{ пер}}{b_{б.д}} \left(1 - \frac{h_z \text{ пер}}{b_{б.д}} \right). \quad (9)$$

Для остальных зависимостей наблюдается постоянное увеличение нагрузки от деформации, однако оно не одинаковое. Наименьшая

интенсивность прироста нагрузки характерна для расчета по формуле (6), наибольшая — по формуле (7).

При расчете нагрузки на КД многоосного КТС ее незначительный прирост в зоне больших относительных деформаций приводит в ряде случаев к неопределенности и зацикливанию. Поэтому, поскольку в реальности при больших значениях относительной деформации шина не работоспособна, желательно иметь зависимость, согласно которой нагрузка при больших значениях относительной деформации резко возрастает.

Для формул (4) и (7) (см. рис. 3, б) при $\tilde{h}_{z \text{ пер}} \geq 0,9$ сначала определяют $P_{z \text{ пер}}$ (см. выражение (1)), а затем

$$P_z = 0,1P_{z \text{ пер}}(1 - \tilde{h}_{z \text{ пер}}). \quad (10)$$

Аналогичный подход можно применить и к другим зависимостям.

Несколько слов о площади контакта $F_{\text{ш}}$, используемой для определения P_z по формуле (1), а также $p_{\text{ш}0}$ — по формуле (3). На твердой ОП нормальные деформации h_z незначительны ($\tilde{h}_{z \text{ пер}} = 0,08 \dots 0,14$) и боковины шины не касаются ОП. Площадь контакта и среднее давление определяются выражениями

$$F_{\text{ш}} = k_{F_{\text{ш}}} b_{\text{ш}x} b_{\text{ш}y}; \quad \bar{p}_z = 10^{-6} P_z / F_{\text{ш}},$$

где $k_{F_{\text{ш}}}$ — коэффициент площади; $b_{\text{ш}x}$, $b_{\text{ш}y}$ — соответственно длина и ширина контакта:

$$b_{\text{ш}x} = 2\sqrt{2r_{\text{св}}h_z - h_z^2};$$

$$b_{\text{ш}y} = \begin{cases} b_{\text{б.д}} & \text{при } h_z \geq h_{\text{б.д}}; \\ 2\sqrt{2r_{\text{б.д}}h_z - h_z^2} & \text{при } h_z < h_{\text{б.д}}, \end{cases}$$

где $r_{\text{св}}$ — свободный радиус шины; $h_{\text{б.д}}$, $r_{\text{б.д}}$ — соответственно стрела дуги прогиба и поперечный радиус беговой дорожки шины.

В большинстве случаев при определении $F_{\text{ш}}$ используют уравнение эллипса $k_{F_{\text{ш}}} = 0,25\pi$. Однако для современных шин наблюдается тенденция возрастания $r_{\text{б.д}}$ с уменьшением $h_{\text{б.д}}$ и форма контакта отличается от эллипса.

Оценим относительное увеличение площади контакта $\tilde{F}_{\text{ш с-э}} = F_{\text{ш с}} / F_{\text{ш э}}$, полученного горизонтальным сечением шины $F_{\text{ш с}}$, по сравнению с площадью эллипса $F_{\text{ш э}}$ при одной и той же деформации h_z .

Продольное сечение с поперечной координатой y_i характеризуется свободным радиусом $r_{св i}$ и продольной координатой x_i . Площадь сечения определяют численным интегрированием при малых значениях dy :

$$F_{ш с} = 4 \int_0^{0,5b_{шy}} x_i dy,$$

где $x_i = \sqrt{r_{св i}^2 - (r_{св} - h_z)^2}$; $r_{св i} = r_{св} - r_{\text{б.д}} + \sqrt{r_{\text{б.д}}^2 - y_i^2}$. На рис. 4 видно значительное отличие исследуемых площадей, что при вычислениях может приводить к серьезным погрешностям. При расчетах надежнее в зоне $\tilde{h}_{z \text{ п}} > 0,06$ использовать $F_{ш с}$.

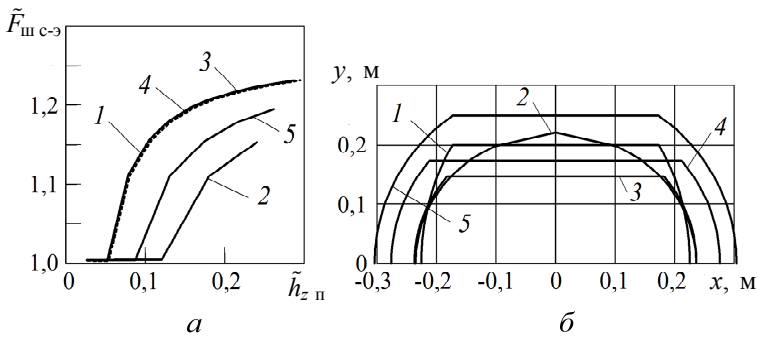


Рис. 4. Зависимость отношения площадей плоского контакта от относительной деформации профиля шин (а) и половина контура контакта при сечении шины горизонтальной плоскостью при $\tilde{h}_{z \text{ п}} = 0,12 \dots 0,13$ (б) для шин 1200×500-508 (1), 1300×530-533 (2), 14.00-20 (3), 16.00-20 (4) и 1600×600-685 (5)

Таким образом, предлагаемые зависимости позволяют при изменяемых значениях эксплуатационных параметров P_z и p_w повысить точность расчета деформации h_z КД, а следовательно, параметров подвижности и нагруженности систем КТС, а также снизить погрешности вычисления реакций по колесам многоосных КТС при движении на подъемах, спусках, крупных неровностях и сильно деформирующихся ОП.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Агейкин Я.С. *Пройодимость автомобилей*. Москва, Машиностроение, 1981, 232 с.
- [2] Петрушов В.А., Московкин В.В., Евграфов А.Н. *Мощностной баланс автомобиля*. Москва, Машиностроение, 1984, 160 с.

- [3] Бидерман В.Л., Гуслицер Р.Л., Захаров С.П. *Автомобильные шины*. Москва, Госхимиздат, 1963, 384 с.

Статья поступила в редакцию 11.10.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ларин В.В. Зависимости вертикальной деформации пневматических шин. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/1032.html>

Ларин Василий Васильевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области проходимости колесных машин. e-mail: larin.lv20946@yandex.ru