

УДК 531. 629.113

*СУНЦОВ Н.В., д.х.н., к.ф.-м.н., профессор; ПИСАНЕЦ А.А., к.т.н., доцент;
ЛАЗАРЕНКО А.И., магистр; ЗАЙЦЕВ Р.С., магистр;
МЕЛЬНИЧЕНКО В.В., магистр; МЕЗЕНЦЕВ С.Г., магистр
Донецкая академия автомобильного транспорта*

ОЦЕНКА ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ НА ДЕФОРМАЦИЮ РАСТЯНУТОЙ ВОЗДУХОМ ШИНЫ ВО ВРЕМЯ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ

На основе анализа экспериментальных результатов по определению коэффициентов сопротивления качению колеса автомобиля разработана методика оценки энергетических потерь на деформацию шины в сложной упругой системе «сжатый воздух + растянутая воздухом шина».

Ключевые слова: деформация шины, энергетические потери, коэффициент сопротивления

Постановка проблемы

При качении эластичного ведомого колеса автомобиля по горизонтальному и сухому асфальтобетону в установившемся режиме давление воздуха в шине и его температура остаются практически постоянными. Следовательно, при качении колеса затраты энергии идут в основном на деформацию растянутой воздухом шины и, в первом приближении, нет затрат энергии на сжатие воздуха так как его объем и температура остаются практически постоянными.

Во время качения колеса происходит значительная деформация шины, особенно в области пяточки контакта, что приводит к существенной потере энергии. Очевидно, представляет большой теоретический и практический интерес разработка методики оценки потерь энергии на деформацию шины, растянутую сжатым воздухом для конкретных марок различных производителей [1-5].

Цель статьи

Целью данной работы является вывод практически удобной формулы, которая может быть использована для оценки затрат энергии на деформацию растянутой воздухом шины при ее качении.

Теория

Как отмечено выше, при установившемся движении эластичного ведомого колеса объем воздуха в шине и его температура практически не изменяются и, следовательно, не происходит затрат энергии на сжатие воздуха. Оценим в первом приближении величину затрачиваемой энергии на деформацию эластичного колеса растянутого сжатым воздухом при его качении по горизонтальному сухому полотну дороги (например, по сухому асфальтобетону).

Рассмотрим следующий эксперимент.

Пусть легковой автомобиль загружен равномерно на все четыре колеса. Представим, что одно из колес с помощью домкрата мы немного приподняли так, чтобы оно не касалось полотна дороги. Далее поступим следующим образом:

- 1) Измерим давление воздуха в шине (P_1) манометром при температуре T_1 .
- 2) С помощью домкрата медленно опускаем колесо до полного контакта с полотном. В пятке контакта с дорогой колесо проседает на некоторую величину h . Деформация упругой системы «растянутая воздухом шина + сжатый воздух» происходит за счет силы, действующей на ось данного колеса.

Следует отметить, что согласно эффекту Джоуля-Томсона при сжатии воздух мог немного нагреться, хотя мы и опускали домкрат медленно так, чтобы газ успевал охладиться практически до температуры окружающего воздуха. Поэтому необходимо в положении №2 сделать паузу до тех пор, пока давление дополнительно сжатого воздуха в шине не станет постоянным (P_2), что определит постоянную температуру воздуха в шине ($T_2 \approx T_1$).

Отметим так же, что при деформации шина за счет сил внутреннего трения немного нагревается даже за один цикл. Но благодаря малому количеству теплоты за один цикл сжатия и незначительной теплопроводности резины этим эффектом в нашем опыте мы пренебрегаем, так как выдерживаем паузу.

При длительном движении автомобиля, как известно, шины нагреваются значительно и главным образом за счет сил внутреннего трения. При постоянной скорости движения увеличение температуры шины происходит до тех пор, пока не наступит тепловое равновесие за счет развития процессов теплопроводности и теплового излучения. Это явление будет предметом обсуждения следующей статьи. В настоящей работе мы оцениваем потери энергии на деформацию шины.

Таким образом, исследуемая упругая система «растянутая воздухом шина + сжатый воздух» перешла из состояния №1 в состояние №2 под действием силы m_1g :

Состояние №1. Давление P_1 при температуре T_1 . Объем воздуха V_1 .

Состояние №2. Давление P_2 при температуре $T_2 \approx T_1$. Объем воздуха уменьшился на некоторую величину и стал равным V_2 . За счет силы m_1g произошло сжатие воздуха и деформация шины.

При условии эксперимента ($T_2 \approx T_1$) адиабатическое сжатие воздуха произошло практически изотермически (показатель адиабаты $\gamma \approx 1$) при сохранении постоянной массы воздуха. Согласно закону сохранения энергии для состояний №1 и №2 справедливо следующее уравнение:

$$0,5m_1gh = A_1 + A_2, \quad (1)$$

где $0,5m_1gh$ – работа, затраченная на деформацию упругой системы «растянутая воздухом шина + сжатый воздух» в вертикальном направлении за счет силы, действующей на ось колеса. Так как данная равнодействующая сила изменяется от начального значения, равного m_1g , до конечного, равного нулю (сила упругости в конечной точке уравновешивает силу тяжести), то необходимо взять среднее значение силы. При этом считаем, что выполняется закон Гука. Упругая сила в вертикальном направлении, в виду малости величины деформации h , прямо пропорциональна ее величине.

A_1 – работа сжатия конкретной шины растянутой воздухом от начального до конечного состояния (до значения проседания на величину h);

A_2 – работа сжатия воздуха массы m в шине при постоянной температуре T_1 от объема V_1 до объема V_2 (или от давления P_1 до давления P_2).

Величина, затраченной над газом работы численно равна работе расширения газа, взятой с противоположным знаком:

$$A_2 = -(m/M) \mathfrak{R}T \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = -(m/M) \mathfrak{R}T \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = -(m/M) \mathfrak{R}T \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (2)$$

где M – масса моля воздуха,
 m – масса воздуха в шине;

\mathcal{R} – универсальная газовая постоянная;
 T – абсолютная температура газа.

Так как значения логарифма отношений V_2/V_1 и P_1/P_2 отрицательные, то в итоге знак перед значением работы A_2 положителен. Удобнее для расчетов использовать отношение давлений, так как давление легко определить точными манометрами. Объем же V_2 измерить с достаточной точностью затруднительно, так как при сжатии шина меняет форму. По бокам у беговой дорожки она расширяется, а на беговой дорожке уменьшается. Кроме того вся шина несколько изменяет форму. Но с учетом того факта, что шина достаточно прочная по своей конструкции из-за наличия корда, то небольшим изменением ее объема в положении №2 можно пренебрегать в первом приближении.

Тогда работа, затраченная на сжатие шины в одном положении (без вращения колеса) равна

$$A_1 = 0,5m_1gh - A_2 = 0,5m_1gh - (m/M) \mathcal{R}T \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (3)$$

При одном обороте колеса эта работа увеличивается на величину отношения $2\pi(R-h)/L$, которое показывает во сколько раз длина окружности колеса больше длины деформированной части шины (иначе говоря, длины пятка контакта L). При дальнейшем качении колеса эту работу необходимо умножить еще и на число оборотов колеса N . Очевидно, что число оборотов

$$N = \frac{S}{2\pi(R-h)} = \frac{vt}{2\pi(R-h)}, \quad (4)$$

где v – скорость автомобиля,
 $(R-h)$ – радиус качения.

Таким образом, мы на практике легко можем оценить потери энергии A^* на деформацию растянутой сжатым воздухом шины любого производителя при ее качении по удобной формуле:

$$A^* = \left\{ \frac{2\pi(R-h)}{L} \right\} \cdot NA_1 \quad (5)$$

Эксперимент

При проведении опытов с автомобилем рационально начинать не с состояния №1, а с состояния №2. Автомобиль устанавливают горизонтально, например, на асфальтобетон. Вначале накачивают шины воздухом до рекомендуемого производителем значения. Например, для автомобиля Chevrolet Aveo рекомендуемое давление $P_2 = 210$ кПа. Такое давление устанавливается на всех четырех колесах. Делается выдержка для установления постоянной температуры T_2 . Измеряется величина проседания колес h .

Следует отметить, что при исследованиях необходимо использовать как можно более точные манометры, так как основная ошибка при вычислении работы сжатия воздуха в шине по формуле (2) зависит, прежде всего, от точности измерения давлений в состояниях №1 и №2.

Мы использовали различные манометры и автомобильный компрессор с функцией автостопа и со встроенным электронным манометром в том числе. Во время исследований для повышения точности измерений электронный манометр не отключался и не отсоединялся от ши-

ны. Благодаря этому осуществлялось непрерывное измерение давления воздуха при переводе колеса из одного состояния в другое.

Массу m воздуха в шине определяли, используя ее положение №1 как значение произведения плотности сжатого воздуха в шине при давлении P_1 на его объем V_1 : $m = \rho_1 V_1$. Плотность же воздуха определялась по формуле [1]:

$$\rho_1 = \rho^* \cdot \frac{P_1}{P^*} \cdot \frac{T^*}{T_1} \quad (6)$$

где ρ_1 – плотность (кг/м³);

$\frac{P_1}{P^*}$ – отношение давления сжатого воздуха в шине к нормальному давлению атмосферного воздуха ($P^* = 760$ мм рт. ст. = 105 Па);

$\frac{T^*}{T_1}$ – отношение температур при нормальных условиях ($T^* = 273$ К).

Объем воздуха V можно оценить с помощью формулы для объема тороида [2], введя поправочный коэффициент z :

$$V_{TOP} = z \cdot 2\pi^2 \cdot R \cdot r^2 \quad (7)$$

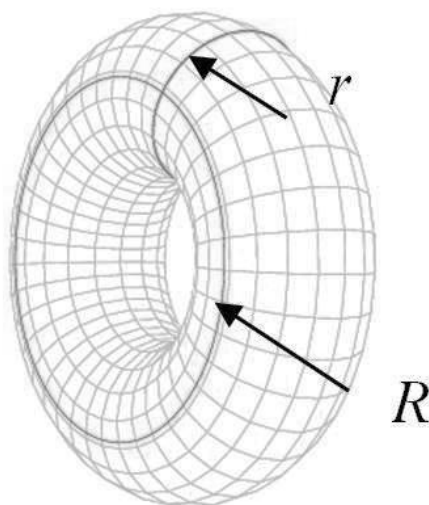


Рис.1 Пояснение к формуле (7) для вычисления объема тороида.

Введение поправочного коэффициента необходимо потому, что действительный объем шины легкового автомобиля примерно на 25% меньше, чем значение, вычисленное по формуле тороида [2]. Это связано с тем, что сечение шины не совсем круглое (максимальная площадь у круга). Поэтому полученное значение объема необходимо умножить еще на поправочный коэффициент $z = 0,75$.

Универсальная газовая постоянная $\mathfrak{R} = 8,31447$ ДжК⁻¹моль⁻¹.

Молярная масса сухого воздуха $M = 0,028966$ кг/моль. Это значение получается с учетом того, что воздух является смесью газов:

$$M_{смеси} = M_1 N_1 + M_2 N_2 + M_3 N_3 + \dots, \quad (8)$$

где M – молярная масса компонентов,

N – его массовая доля (процентная концентрация, деленная на 100) [3].

Как видно из таблицы 1, воздух в основном состоит из азота и кислорода с примесью аргона.

Таблица 1

Процентный состав воздуха на уровне моря при температуре 15°C и давлении 101325 Па [3]

| Газ | Символ | Содержание |
|------------|-----------------|------------|
| Азот | N ₂ | 78,084 |
| Кислород | O ₂ | 20,9476 |
| Аргон | Ar | 0,934 |
| Углек. газ | CO ₂ | 0,0314 |
| Неон | Ne | 0,001818 |
| Метан | CH ₄ | 0,0002 |
| Гелий | He | 0,000524 |
| Криптон | Kr | 0,000114 |
| Водород | H ₂ | 0,00005 |
| Ксенон | Xe | 0,0000087 |

1) Оценка величины выражения $0,5m_1gh$.

Общая (снаряженная, без пассажиров) масса автомобиля 1200 кг. Ее распределение между осями: передние – 60,6%; задние – 39,4%, то есть 727,2кг и 472,8кг на переднюю и заднюю оси или 363,6кг и 236,4кг на передние и задние колеса. Величины проседания h для передних и задних колес составляют 3 и 2 см. Так как передние и задние шины одной марки, одинакового состояния износа и новые, целесообразно оценить результаты измерений величины проседания шин при помощи коэффициентов упругости.

$$k_{пер} = \frac{m_1g}{h_{пер}} = \frac{363,6 \cdot 9,81}{0,03} = 118897 (Н/м);$$

$$k_{задн} = \frac{m_2g}{h_{задн}} = \frac{236,4 \cdot 9,81}{0,02} = 115954 (Н/м);$$

$$\frac{k_{задн}}{k_{пер}} = \frac{115954}{118897} = 0,975 \text{ (совпадение на } 97,5\%).$$

Расхождение на 2,5% свидетельствует, что результаты хорошо согласуются между собой.

Оценим величину выражения $0,5m_1gh$:

$$0,5m_1gh_{пер} = 0,5 \cdot 363,6 \cdot 9,81 \cdot 0,03 = 53,5 \text{ (Дж)}$$

$$0,5m_1gh_{задн} = 0,5 \cdot 236,4 \cdot 9,81 \cdot 0,02 = 23,2 \text{ (Дж)}$$

2) Оценка работы сжатия воздуха

$$A_2 = -\frac{m}{M} \mathfrak{R}T \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right),$$

где m – масса воздуха $m = \rho_1 V_1$;

$$\rho_1 \text{ – плотность воздуха } \rho_1 = \rho^* \cdot \frac{P_1}{P^*} \cdot \frac{T^*}{T_1}$$

Величина ρ^* – плотность сухого воздуха при различной температуре и нормальном атмосферном давлении (760 мм рт. ст. = 10^5 Па). Ее можно определить при помощи табл. 2. Во время опытов температура была равна 20°C

Таблица 2

Плотность ρ^* сухого воздуха [3]

| | | | | | | |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура $t, ^\circ\text{C}$ | 0 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 |
| Плотность, кг/м^3 | 1,293 | 1,275 | 1,257 | 1,239 | 1,221 | 1,205 |

Рассмотрим параметры шины 185/55R15. 82V.

Наружный радиус профиля шины $185/2 = 92,5(\text{мм})$. За вычетом толщины стенок шины (5мм) внутренний радиус тора $r = 92,5 - 5 = 87,5(\text{мм}) = 0,0875(\text{м})$.

Радиус обода 0,2 м. Наружный диаметр колеса 0,588м, а радиус – 0,294 м. Ширина беговой дорожки – 15 см.

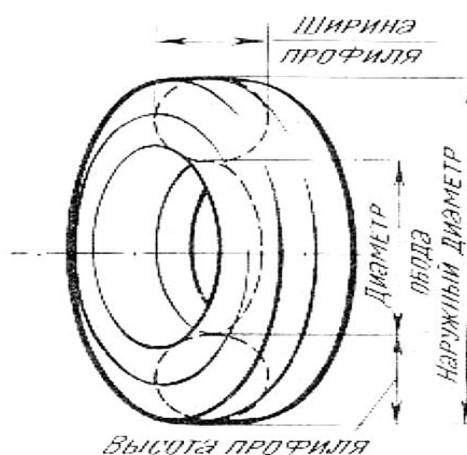


Рис. 2. Основные размеры шины

На сухом асфальтобетоне при давлении воздуха в шине 210 кПа и скорости 30-60 км/ч коэффициент сопротивления качению равен 0,015 – 0,018 [4-5].

Высота профиля равна разности между величинами $0,294 \text{ м} - 0,2 \text{ м} = 0,094 \text{ м}$. Половина высоты профиля 0,047м.

Радиус тора $R = 0,047 \text{ м} + 0,2 \text{ м} = 0,247 \text{ м}$ (см. рис.1).

Объем воздуха в шине равен:

$$V = 0,75 \cdot 2\pi^2 \cdot R \cdot r^2 = 0,75 \cdot 2\pi^2 \cdot 0,247 \cdot 0,0875^2 = 0,027968 \text{ м}^3 \approx 27,97 \text{ л}$$

Плотность воздуха в шине равна:

$$\rho_1 = \rho^* \cdot \frac{P_1}{P^*} \cdot \frac{T^*}{T_1} = 1,205 \cdot \frac{210}{100} \cdot \frac{273}{293} = 2,358 \text{ кг/м}^3$$

Масса воздуха в шине

$$m = \rho_1 V_1 = 2,358 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,027968 \text{ м}^3 = 0,06595 \text{ кг}$$

Оценим величину работы сжатия воздуха при $h=3\text{см}$

$$A_2 = -\frac{m}{M} \mathfrak{R}T \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = -\frac{0,06595}{0,028966} \cdot 8,31447 \cdot 293 \cdot \ln\left(\frac{208,2}{210}\right) = 47,76 \text{ Дж}$$

Энергия на деформацию такой шины у стоящего автомобиля равна работе A_1 :

$$A_1 = 0,5m_1gh - A_2 = 53,5 - 47,76 = 5,74 \text{ Дж (при } h=3\text{см)}$$

При движении на один оборот колеса затраченная энергия возрастет, как показано выше, на величину отношения $\frac{2\pi(R-h)}{L} = \frac{1,827}{0,15} = 12,18$ раз и составит 70 Дж .

Сравним величину затраченной энергии на деформацию растянутой воздухом шины (70 Дж) со всей израсходованной энергией на движение при тех же условиях (скорость $30\text{-}40 \text{ км/ч}$, один оборот колеса, коэффициент сопротивления качению $k=0,015\text{-}0,018$). Отметим, что сила сопротивления качению при постоянной скорости движения численно равна силе тяги:

$$F_c = F_T = km_1g = (0,015 \div 0,018) \cdot 363,6 \cdot 9,81 = (53,5 \div 64,2) \text{ Н}$$

Работа A_F этой силы за один оборот колеса равна:

$$A_F = F_c \cdot S = 2\pi(R-h) \cdot (53,5 \div 64,2) = (97,8 \div 117,3) \text{ Дж},$$

где $(R-h) = 0,294 \text{ м} - 0,03 \text{ м} = 0,291 \text{ (м)}$.

Таким образом, имеем два значения затраченной энергии:

а) $A_F = (97,8 \div 117,3) \text{ Дж}$ – вся энергия, затраченная на один оборот при постоянной скорости движения колеса.

б) $A^* = \left\{ \frac{2\pi(R-h)}{L} \right\} \cdot A_1 = 70 \text{ Дж}$ – затраты энергии A^* на деформацию растянутой сжатым

воздухом шины при ее качении на один оборот.

Сравним эти значения:

- для $k=0,015$ имеем $70/97,8=0,715 \approx 0,7$ или 70% затрат на деформацию шины;
- для $k=0,018$ имеем $70/117=0,598 \approx 0,6$ или 60% затрат на деформацию шины.

Выводы

1. Получена формула для оценки потерь энергии на деформацию эластичной шины при ее качении в ведомом режиме по горизонтальному и сухому асфальтобетону.

2. Проведены эксперименты по исследованию потерь энергии на деформацию растянутой воздухом шины марки $185/55R15$ легкового автомобиля Chevrolet Aveo.

3. Установлено, что потери энергии у легкового автомобиля на деформацию шины значительны. Например, при скорости движения $30\text{-}60 \text{ км/ч}$ по сухому асфальтобетону они могут со-

ставлять 60-70% от общих затрат энергии на качение при коэффициенте сопротивления качению $k=(0,015-0,018)$.

Список литературы

1. Сунцов Н.В., Макаров В.А., Куплинов А.В. К вопросу об оценке коэффициента сопротивления воздуха и числа Рейнольдса при движении автомобиля // Вісник Донецкої академії автомобільного транспорту. – 2008. № 3. С. 42-47.
2. [http:// ru. wikipedia. org /wiki / Тороид](http://ru.wikipedia.org/wiki/Тороид).
3. [http:// ru. wikipedia. org / wiki / Атмосфера](http://ru.wikipedia.org/wiki/Атмосфера).
4. Сунцов Н.В., Макаров В.А., Сунцов А.Н., Ефименко А.Н. О физике процессов определяющих величину коэффициента сопротивления качению колеса автомобиля // Вісник Донецкої академії автомобільного транспорту. – 2011. № 2. С. 78-81.
5. Балабин И.В., Путин В.А., Чабунин И.С. Автомобильные и тракторные колеса и шины. – МГТУ «МАМИ», 2012. – 920с.

Сунцов М.В., Писанець О.О., Лазаренко А.І., Зайцев Р.С., Мельниченко В.В., Мезенцев С.Г. Оцінка витрат енергії на деформацію розтягнутої повітрям шини під час руху автомобіля

Анотація. На основі аналізу експериментальних результатів щодо визначення коефіцієнтів опору коченню колеса автомобіля отримана формула щодо визначення витрат енергії на її деформацію.

Ключові слова: деформація шини, енергетичні витрати, коефіцієнт опору

Suntsov N.V., Pisanets A.A., Lazarenko A.I., Zaytsev R.S., Melnichenko V.V., Mezentsev S.G. Evaluation of the energy spent for deformation of a stretched air tires while driving car

Abstract. Based on the analysis of experimental results on the determination of coefficients rolling resistance of the wheels obtained the formula for determining energy costs in its deformation.

Keywords: deformation of tire, energy costs, coefficient resistance

Стаття надійшла до редакції 03.06.2014 р.