

УДК 531; 629.113

СУНЦОВ Н.В., д.х.н., к.ф.-м.н.; СУНЦОВ А.Н., к.ф.-м.н., доц.;
СТРЕЛЬНИК Ю.Н., инженер
Донецкая академия автомобильного транспорта

К ВОПРОСУ О ПОТЕРЯХ ЭНЕРГИИ НА КАЧЕНИЕ ЭЛАСТИЧНЫХ КОЛЕС АВТОМОБИЛЯ

Проведена оценка энергетических затрат на преодоление сопротивления качению эластичных колес автомобиля при его движении по сухому асфальтобетону. Используется экспоненциальная зависимость коэффициента сопротивления качению от величины давления воздуха в шине и скорости движения.

Ключевые слова: автомобиль, эластичная шина, сопротивление качению

Введение

Для получения надежных данных о влиянии скорости на величину коэффициента сопротивления качению колеса автомобиля авторами работ [1-2] был выполнен анализ результатов экспериментальных исследований и литературных данных по определению коэффициентов сопротивления качению колеса автомобиля с целью установления математических закономерностей, связывающих величину коэффициента сопротивления качению со скоростью движения автомобиля и давлением воздуха в шинах в широких интервалах скоростей 30-170 км/ч и давлений 100-500 кПа. Для выяснения физики процессов, влияющих на величину коэффициента сопротивления качения, были выбраны особые условия, при которых влиянием некоторых параметров можно пренебречь. Так, например, при движении колеса по асфальтобетонному покрытию со скоростью 30 км/ч и давлении воздуха в шинах 200 кПа величина $k = 0,015$ [1-9]. Значение увеличивается с ростом скорости и падает при увеличении давления в шинах. Эти условия эксперимента уникальны, потому что хорошо проявляются влияния давления воздуха в шине и скорости движения. При этом можно пренебречь, в первом приближении, влиянием неровностей дороги и деформацией ее поверхности, а также потерей энергии на отрыв шины от опорной поверхности. Все измерения проведены в одинаковых условиях и в достаточном количестве, что позволяет более точно выявлять значимость влияния давления и скорости на величину k в относительных единицах. Зависимости коэффициента сопротивления качению от скорости движения и давления в шине описываются сложными кривыми. Величина k существенно меняется при изменении давления P и скорости движения V . В трехмерном пространстве (k, P, V) экспериментальные точки представляют собой сложную поверхность. Исследования показали [1-2], что все зависимости – сложные кривые, кроме случая $\ln k - V$. Это позволяет получить уравнения прямых с большой точностью с помощью метода наименьших квадратов (точность расчетов значительно превосходит ошибки результатов измерений).

Таким образом, общий вид зависимости $k_i = f(V)$ при $P_i = const$ имеет вид:

$$\ln k_i = \ln k_{0i} + c_i V, \quad (1)$$

где c_i – тангенс угла наклона прямой в графике $\ln k - V$.

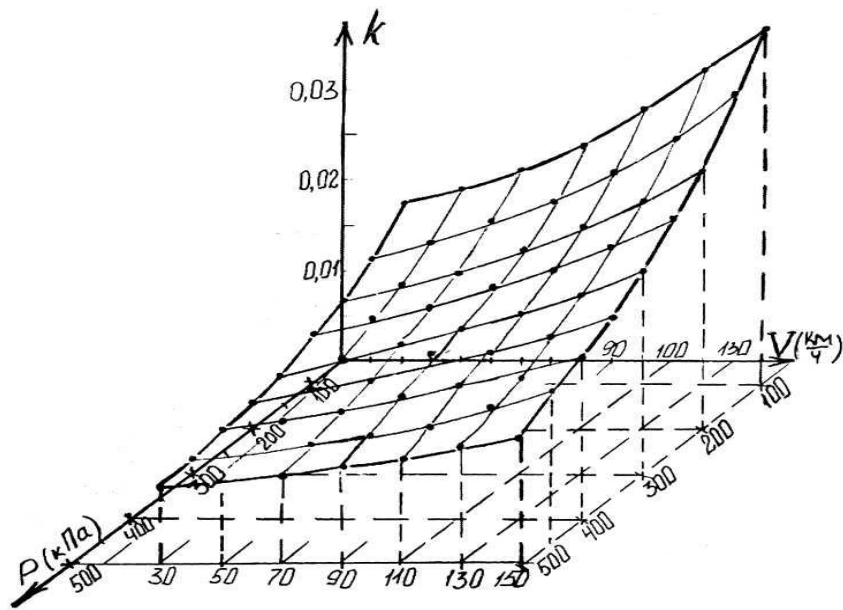


Рис. 1. Зависимость коэффициента сопротивления качению от скорости движения автомобиля и давления воздуха в шинах в трехмерном пространстве (k, V, P)

Из уравнения (1.2) следует, что:

$$\ln\left(\frac{k}{k_0}\right) = cV \text{ для данного } k_0.$$

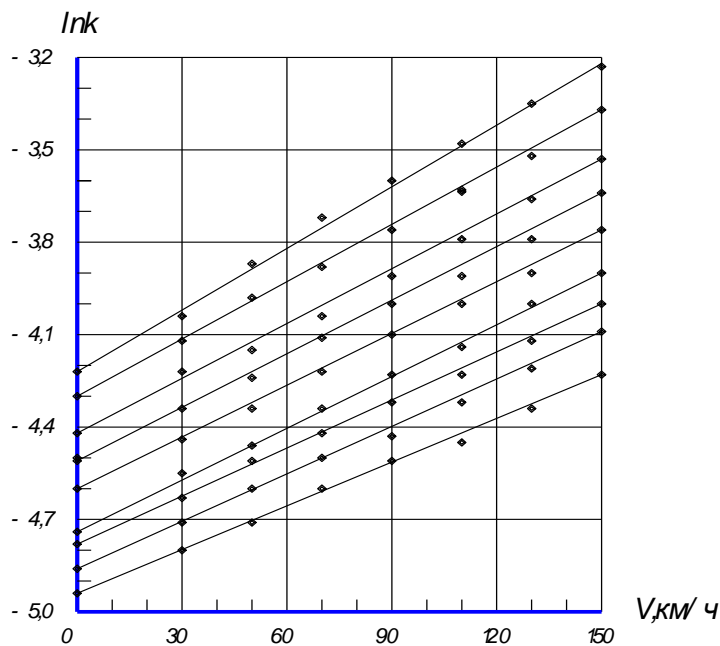


Рис. 2. Зависимость $\ln k$ от V при различном давлении воздуха в шине [1-2]

Тогда:

$$\frac{k}{k_0} = e^{cV} \text{ или } k = k_0 \cdot e^{cV} = k_0 \cdot e^{\frac{V}{V_0}}. \tag{2}$$

Величина $\ln\left(\frac{k}{k_0}\right) = \frac{V}{V_0}$ показывает, во сколько раз линейная скорость колеса превышает не-

которую эффективную скорость V_0 . Очевидно, что здесь имеется ввиду эффективный радиус колеса $(R-h)$. Эластичная шина, наполненная воздухом, является упругой средой. Под действием внешних сил в этой среде будут возникать деформации. После появления внешних влияний деформация распространяется в упругой среде в виде волн, которые переносят энергию. Очевидно, что эти волны будут со временем угасать, а энергия их перейдет в теплоту.

Во время качения ведущего колеса по поверхности дороги в эластичной шине возникают некоторые сжатия и растяжения [4]. Таким образом, у ведущего колеса могут возникать продольные волны. При этом действует сила упругости, которая возвращает в положение равновесия смещенные части упругой системы.

Наличие угла схождения колес приводит при движении автомобиля к деформации шины в области ее контакта с дорогой. Пятачок контакта смещается. Это приводит к появлению поперечных колебаний (к поперечным волнам).

Благодаря наличию силы тяжести и силы вертикальной реакции дороги создается дополнительное давление воздуха в шине и автомобиль «проседает» до тех пор, пока сила упругости не уравновесит силу веса.

$$F_{\text{упр}} = -z \cdot \Delta h, \quad (3)$$

где z – коэффициент упругости системы «эластичная шина – сжатый воздух» в вертикальном направлении h ;

Δh – величина деформации в направлении h .

Наличие явления «проседания» на величину Δh приводит к тому, что точки поверхности колеса будут совершать также поперечные колебания, что приведет к появлению поперечных волн.

Это наиболее значительные колебания поверхности шины, потому что имеются значительные отклонения колеблющихся точек от положения равновесия.

Следует отметить, что при движении автомобиля за счет энергии двигателя возникает постоянная деформация шины, которая тем больше, чем меньше давление воздуха в ней. При этом практически не увеличивается сжатие воздуха ($P_W = \text{const}$).

При увеличении давления воздуха эластичное колесо растягивается, что приводит к изменению частоты его собственных колебаний. Подобное явление наблюдается у струны при ее натяжении.

Рассмотрим физический смысл величины V_0 . Из графика зависимости V_0 от P_W имеем:

$$V_0 = V'_0 + \chi P_W. \quad (4)$$

Для рассмотренной шины уравнение (4) принимает вид:

$$V_0 = 41,5 + 3,2 \cdot 10^{-5} \cdot P_W. \quad (5)$$

Построим график зависимости $V_0 = f(P_W)$.

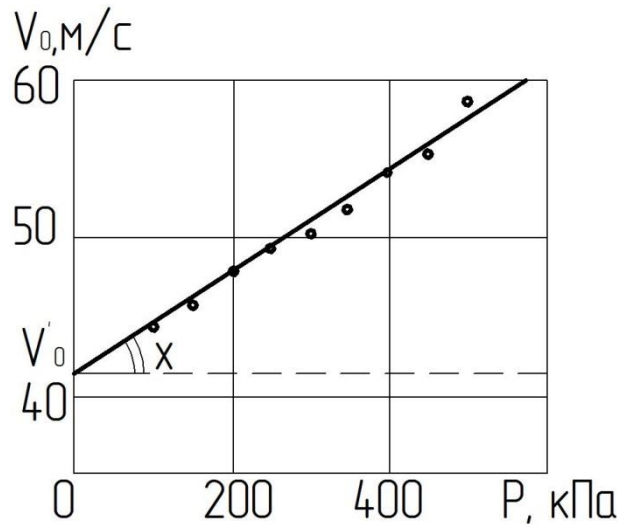


Рис. 3. Зависимость скорости от давления воздуха в шине

Очевидно, что с увеличением давления воздуха P_w в шине возрастает упругая сила. При $P \rightarrow 0$ величина $V_0 \rightarrow 41,5$ м/с.

В предельном случае (*виртуальном*) резина не растянута, потому что давление воздуха в ее середине равно внешнему давлению. Величина V_0 зависит лишь от упругих свойств самой шины.

Заметим, что параметр P_w показывает величину преобладания давления воздуха внутри шины над давлением окружающего воздуха. Выражение $P_w = 0$ означает, что резина уже не будет растянута и ее упругие свойства будут соответствовать свойствам недеформированного упругого эластичного вещества из которого изготовлена покрышка.

Вероятно, величина V_0 связана с наличием упругих волн в шине. Распространение возмущений в шине происходит согласно известным формулам для распространения *продольных* и *поперечных* волн в упругой среде.

Расчеты показали, что величина $V'_0 = 41,5$ м/с практически совпадает с величиной 40,4 м/с (скоростью распространения поперечных волн в резине) и значительно отличается от величины скорости продольных волн (70%). Следовательно, мы имеем дело с *поперечными волнами, возникающими в эластичном колесе при его качении*.

Исследование зависимости коэффициента сопротивления качению показало, что с ростом P_w величина $\ln k_0$ падает, а зависимость $k_0 = f(P_w)$ является прямолинейной.

$$\ln k_0 = \ln k_0^1 - \alpha_1 P_w, \tag{6}$$

где α соответствует величине тангенса угла наклона прямой, изображенной на графике.

При $P_w \rightarrow 0$ величина $\ln k_0 \rightarrow \ln k_0^1$ или $k_0 \rightarrow k_0^1$.

Из (6) получаем:

$$\ln \left(\frac{k_0}{k_0^1} \right) = -\alpha_1 P_w \quad \text{или} \quad k_0 = k_0^1 e^{-\alpha_1 P_w} \tag{7}$$

Параметр k_0^1 определяет значение коэффициента сопротивления качению без влияния давления. При $P_w = 0$ эластичная шина имеет собственную упругость в нерастянутом воздухе состоянии.

При $P_w \neq 0$ рассматривается упругость шины, растянутой с помощью сжатого воздуха. Чем больше давление P_w , тем меньше проседание колеса под действием силы веса и тем меньше затраты энергии на деформацию шины. Следует отметить, что при движении колеса автомобиля давление воздуха при установившемся движении остается практически постоянным. Следовательно, практически затратой энергии на сжатие воздуха можно пренебречь. Конечно, с появлением кочек объем шины ничтожно уменьшается адиабатически и через несколько минут снова увеличивается до прежней величины. Происходит мгновенное нагревание и охлаждение воздуха. За это время резина не успевает заметно изменить свою температуру.

Легко показать, что полученные из экспериментальных значений выражения (2) и (7) являются решениями дифференциального уравнения для описания коэффициента сопротивления качению эластичной шины [3].

Рассмотрим дифференциальное уравнение для зависимости $k = f(P_w)$ при $V = const$. Изменение коэффициента k_0 на величину dk_0 при увеличении давления в шине в интервале $(P_w, P_w + dP_w)$ видимо, зависит от dP_w и k_0

$$dk_0 = -\alpha_1 k_0 dP_w \quad (8)$$

Здесь знак «минус» отражает факт уменьшения k_0 с ростом P_w ; α_1 – коэффициент пропорциональности для данного процесса. После деления обеих частей на k_0 получаем следующее выражение:

$$\frac{dk_0}{k_0} = -\alpha_1 dP_w \quad (9)$$

Это дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными. Выполним интегрирование уравнения (9).

$$\int_{k_0^1}^{k_0} \frac{dk_0}{k_0} = -\alpha_1 \int_0^{P_w} dP_w \quad (10)$$

$$\ln\left(\frac{k_0}{k_0^1}\right) = -\alpha_1 P_w = -\frac{P_w}{P_w^*} \quad (11)$$

Здесь $\alpha_1 \left(\frac{1}{Pa}\right)$ заменена на $P_w^* = \frac{1}{\alpha_1} (Pa)$ для удобства рассмотрения физики процессов.

Таким образом,

$$k_0 = k_0^1 e^{-\alpha_1 P_w} = k_0^1 e^{\frac{-P_w}{P_w^*}} \quad (12)$$

Выражение (12) является, очевидно, *решением* дифференциального уравнения (8) и одновременно совпадает с видом *эмпирической* зависимости.

Таким образом, имеются две зависимости:

$$k = k_0 e^{\frac{V}{V_0}}; \quad k_0 = k_0^1 e^{\frac{-P_w}{P_w^*}}$$

Подставим значение k_0 в первую зависимость:

$$k = k_0^1 e^{\frac{-P_w}{P_w^*}} \cdot e^{\frac{V}{V_0}} \quad (13)$$

Выражение (13) обобщает зависимость $k = f(P_w, V)$. Действительно, при $P_w = const$ получается зависимость $k = f(V)$, а при $V = const$ зависимость $k = f(P_w)$. В этих крайних случаях параметры V_0 и P_w являются постоянными.

Следует отметить, что при выполнении указанной зависимости (13) необходимо использовать зависимость V_0 от P_w .

Таким образом, с помощью зависимости (13) можно оценивать потери энергии на качение эластичных колес автомобиля.

В работе [6] предлагается методика оценки потерь энергии, затрачиваемой при качении эластичного колеса. Исследования затрат энергии дали интересные результаты. Основные из них следующие:

- получена формула для оценки затрат энергии на деформацию эластичной шины при ее качении в установившемся режиме по горизонтальному и сухому асфальтобетону;
- проведены эксперименты по изучению затрат энергии на деформацию растянутой воздухом шины марки 185/55R15 легкового автомобиля Chevrole Aveo;
- установлено, что затраты энергии легкового автомобиля на деформацию шины значительны и, например, при скорости движения 30–60 км/ч по сухому асфальтобетону могут составлять (60–70)% от общих затрат энергии на качение при коэффициенте сопротивления качению $k = (0,015–0,018)$.

Цель статьи

Для характеристики автомобиля, очевидно, большой интерес представляет сумма мощности, затраченной на преодоление сопротивления качению N_f и аэродинамического сопротивления N_V . Она представляет собой мощность сопротивления *равномерному движению* автомобиля по *горизонтальному участку* дороги при безветрии. Величину N_f можно оценить с помощью наших зависимостей (13).

Основная часть

Анализ литературных данных показал, что частично выяснена физика процессов, объясняющих экспериментальные зависимости коэффициентов сопротивления качению колеса автомобиля от скорости его движения. Параметр k_0 в полученных зависимостях характеризует затраты энергии на деформацию шины, а параметр $e^{\frac{V}{V_0}}$ характеризует затраты энергии с изменением скорости движения V и скорости распространения упругих поперечных волн в колесе V_0 . Рост

к с увеличением скорости V определяется затратами энергии на деформацию шины при наличии ее «проседания».

В связи с тем, что *потери мощности на качение шин* намного меньше, чем потери на сопротивление воздуха, то в настоящее время, как правило, его учитывают *приблизительно*.

Оценки потерь мощности N_k на качение шин.

Рассмотрим методику на примере конкретного автомобиля *Chevrolet Aveo*, седан, 2006 г. Из рис. 4 следует, что коэффициент аэродинамического сопротивления автомобиля может быть оценен как $C_x = 0,3$.



Рис. 3. Зависимость среднего значения C_x от года выпуска автомобиля (рассматривались только серийные модели) [10]

В статье [11] исследовали *взаимосвязь* между числом *Рейнольдса* и *коэффициентом лобового сопротивления* на основе серии экспериментов с различными моделями в аэродинамической трубе. Сравним результаты исследований аэродинамических свойств моделей, похожих на наш автомобиль.

Как видно из рис. 4, наш автомобиль *Chevrolet Aveo* (седан, 2006 г.) и модель 1 (седан) хорошо соответствуют по своей форме. Модель 3 (седан) имеет немного более удлиненный капот, чем наш автомобиль. Но форма модели 3 незначительно отличается от нашего автомобиля.



Chevrolet Aveo, седан (2006 г.)



Модель 1, седан.

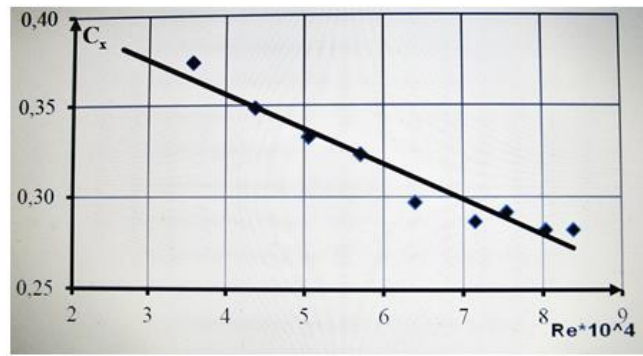


Chevrolet Aveo, седан (2006 г.)

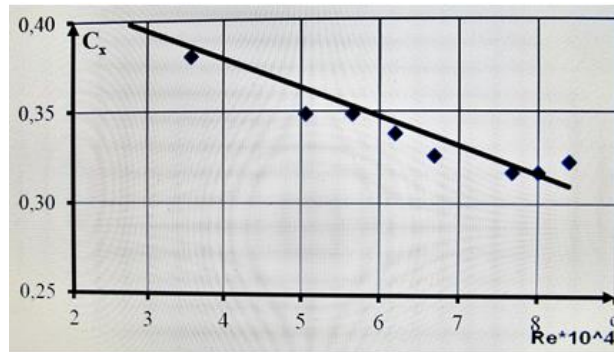


Модель 3, седан. (Длиннее капот)

Рис.4. Сравнение формы автомобиля *Chevrolet Aveo* и испытываемых в аэродинамической трубе моделей



Модель 1, седан



Модель 3, седан

Рис. 5. Зависимости C_x от числа Рейнольдса Re для двух моделей [11].

Из рис. 5 видно, что значение C_x для *Chevrolet Aveo* оценивается величиной 0,3, а число Рейнольдса для двух похожих моделей $Re = 7 - 8 \cdot 10^4$. Число 7 более точное, так как обдуваемая модель по форме более подходящая. Движение автомобиля можно считать турбулентным.

Сила аэродинамического сопротивления F_c определяется по формуле:

$$F_c = \frac{1}{2} C_x \rho S V^2, \tag{14}$$

где $C_x = 0,3$ – безразмерный коэффициент аэродинамического (лобового) сопротивления; ρ – плотность воздуха ($1,23 \text{ кг/м}^3$), $S = 2 \text{ м}^2$ – площадь поперечной проекции. Известно, что при постоянной скорости сила тяги равна силе сопротивления. Затраченная

$$\text{мощность } N_c = A/t = \frac{F_c S}{t} = F_c V.$$

Как видно, зависимость (13) k от скорости движения автомобиля не линейная, а экспоненциальная. Сила сопротивления качения $F_k = k mg$. Следует отметить, что экспонента не стремится к нулю при падении скорости автомобиля, как это предполагалось ранее. Для шины легкого автомобиля при рекомендуемом давлении сжатого воздуха 210 *кПа* скорость поперечных волн, например, равна $V_0 = 41,5 + 3,2 \cdot 10^{-5} \cdot P_w$. С падением давления воздуха в шине (при $P_w \rightarrow 0$) величина поперечных волн в растянутой резине стремится к 41,5 *м/с* – к величине скорости поперечных волн в недеформированной резине.

В таблице 1 приведены сведения об энергетических затратах автомобиля. Эти результаты представлены на рис. 6 – 10.

Таблица 1

Зависимость мощности от скорости для легкового автомобиля

Скорость, V (км/ч) / м/с	0	25 / 6,94	50 / 13,89	75 / 20,83	100 / 27,78	125 / 34,72	150 / 41,67	175 / 48,61
Кэф. сопр. кач., k		0,014	0,0162	0,0187	0,0217	0,0251	0,0292	0,0334
Мощность, N_c (л.с.) / Вт	0	0,18 / 123,4	1,34 / 988,85	4,53 / 3335	10,75 / 7911	20,98 / 15444	36,27 / 26699	57,58 / 42384
Мощность, N_k (л.с.) / Вт	0	1,55 / 1143,8	3,60 / 2649	6,23 / 4585,4	9,65 / 7096,5	13,95 / 10259	19,48 / 14324	25,99 / 18113
Сила, $F_{кч.}$ (Н); $F_k = k \cdot mg$		164,8	190,7	220,1	255,4	295,5	343,7	393,2
Сила, $F_{соп.}$ (Н); $F_c = \frac{1}{2} C_x \rho S V^2$	0	17,777	71,192	160,105	284,77	444,82	640,73	871,92

Кэф. сопр. качению, k

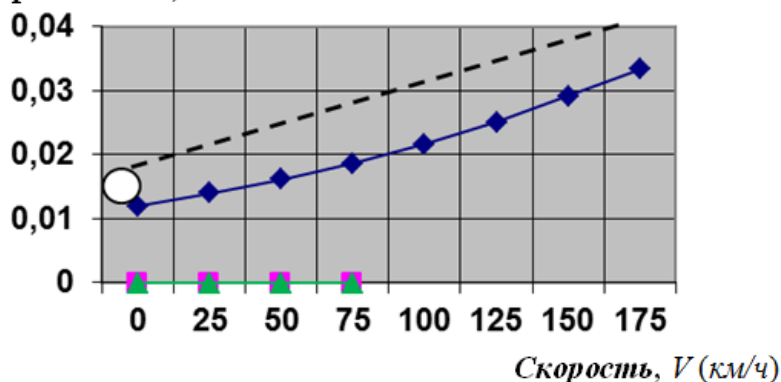


Рис.6. Зависимость k от скорости

Сила F_k , (Н)

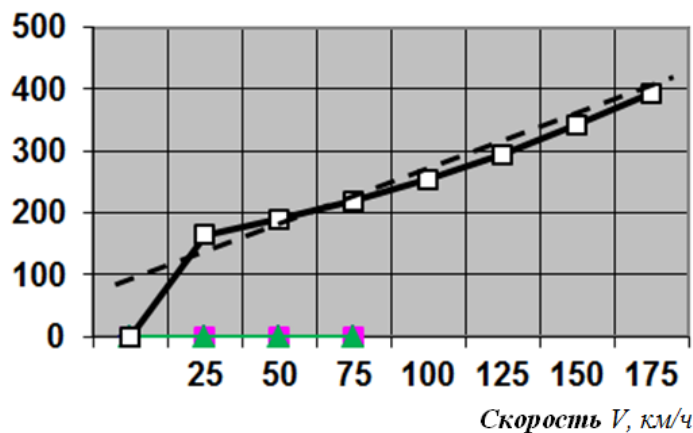


Рис.7. Зависимость силы F_k от скорости автомобиля

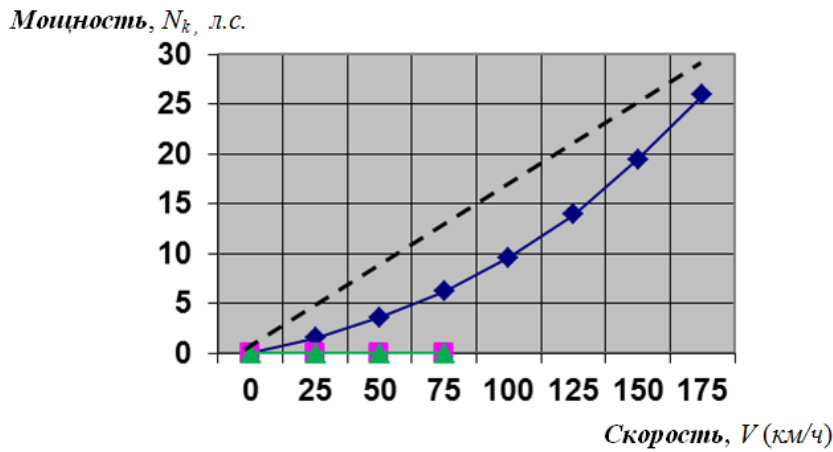


Рис.8. Зависимость мощности, необходимой для преодоления силы сопротивления качению четырех колес автомобиля $N_k = k mg V$, ($m = 1200$ кг).

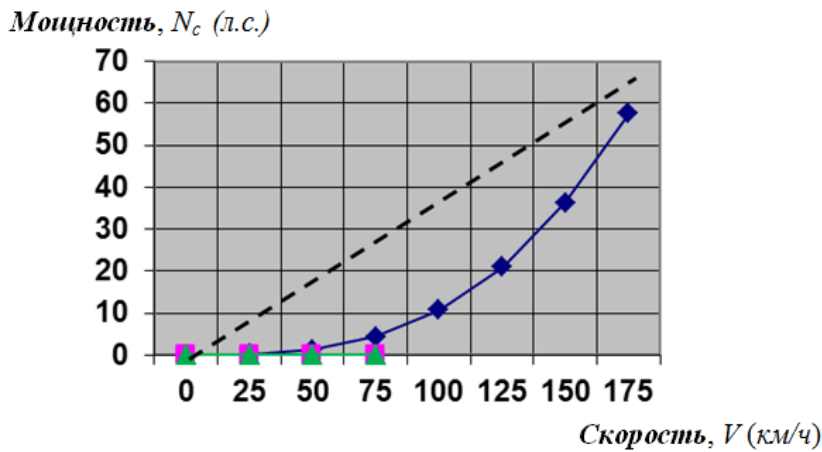


Рис.9. Аэродинамические потери мощности автомобиля

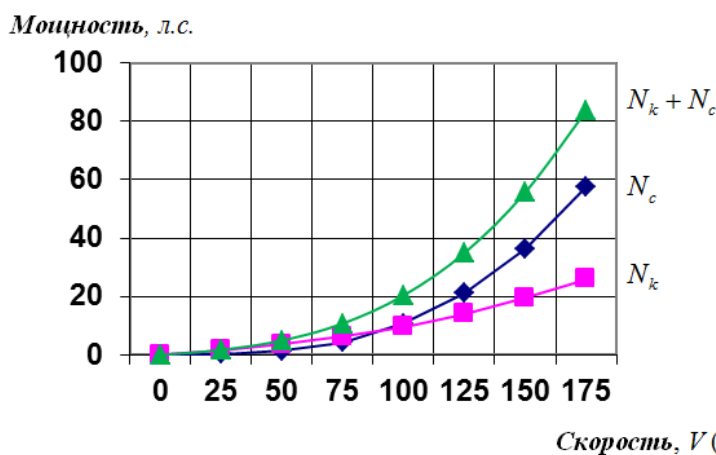


Рис. 10. Потери мощности автомобиля N_k , N_c и $(N_k + N_c)$

Выводы

Проведены оценки потерь мощности автомобиля *Chevrolet Aveo*: N_k , N_c и $(N_k + N_c)$.

Величиной N_k невозможно пренебрегать по сравнению с N_c . Потери энергии на преодоление сопротивления качению колес значительны.

Список литературы

1. Сунцов Н.В., Макаров В.А., Сунцов А.Н., Ефименко А.Н. О физике процессов, определяющих величину коэффициента сопротивления качению колеса автомобиля // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2011. – № 2. – С. 78-81.
2. Сунцов Н.В., Сунцов А.Н., Макаров В.А., Шамота В.П., Ефименко А.Н. К оценке величины коэффициента сопротивления качению колеса автомобиля // Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту. – 2010. – № 2. – С. 75-79.
3. Сунцов Н.В., Макаров В.А., Сунцов А.Н., Ефименко А.Н. Дифференциальные уравнения для коэффициента сопротивления качению колеса автомобиля и их решение // Вісник ДААТ. – 2011. – №4. – С. 83-89.
4. Долматовский Ю.А. Автомобиль в движении. – М.: Транспорт, 1987. – 160 с.
5. Сунцов А.Н. О механизме возникновения шумов от поперечных колебаний при качении эластичной шины // Вісник ДААТ. – 2013. – №2. – С. 70-74.
6. Сунцов Н.В., Писанец А.А., Лазаренко А.И., Зайцев Р.С., Мельниченко В.В., Мезенцев С.Г. Оценка затрат энергии на деформацию растянутой воздухом шины во время движения автомобиля // Вісник ДААТ. – 2014. – №2-3. – С. 60-68.
7. Независимое тестирование шин, изготовленных десятью ведущими фирмами производителями // Журнал «Авторевю». – М. – 2012.
8. Воронин В.В., Кондрашов В.Н., Тимаев Д.М. Механические характеристики автомобильных шин // Известия МГТУ «МАМИ», № 2(10), 2010. – С. 20-23.
9. Балабин И.В., Путин В.А., Чабунин И.С. Автомобильные и тракторные колеса и шины. – МГТУ «МАМИ», 2012. – 920 с.
10. Евграфов А. Н. Аэродинамика автомобиля. – М.: МГИУ, 2010.
11. Андрианов Л.В., Мухина М.Л., Чеботаев В.Ф. Исследование аэродинамических характеристик автомобиля в аэродинамической трубе. – НГТУ. – Н. Новгород, 2000. – 19 с.

Сунцов М.В., Сунцов А.М., Стрельник Ю.М. До питання про втрати енергії на кочення еластичних коліс автомобіля

Анотація. Проведено оцінку енергетичних витрат на подолання опору коченню еластичних коліс автомобіля при його русі по сухому асфальтобетону. Використовується експоненціальна залежність коефіцієнта опору коченню від величини тиску повітря в шині і швидкості руху.

Ключові слова: автомобіль, еластична шина, опір коченню

Suntsov N.V., Suntsov, A.N., Strelnik Y.M. The question of the energy losses due to rolling of elastic wheels of the car

Annotation. The possibility of using three frames of reference when considering the physics of the processes that create rolling resistance the wheels of the car

Keywords: car, elastic tire, rolling resistance

Стаття надійшла до редакції 15.11.2015 р.