

Абрамов Д. В.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЕРЕДНЕПРИВОДНЫХ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ С УЧЕТОМ ПОДЪЕМНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИЛЫ

В данной статье определены предельные по условию сцепления ведущих колес с дорогой динамические показатели переднеприводных автомобилей с учетом подъемной аэродинамической силы, динамического перераспределения нормальных реакций между колесами передней и задней осей автомобиля.

Ключевые слова: предельное ускорение, предельная скорость, подъемная аэродинамическая сила, переднеприводный автомобиль.

Постановка проблемы. Динамические свойства автомобиля определяют его способность безопасно вписываться в интенсивный транспортный поток, как в городских условиях, так и на загородных трассах. В настоящее время показатели динамических свойств современных автомобилей только растут. Ускорение автомобиля, развиваемое при трогании с места или при разгоне с определенной скорости, является одним из таких показателей.

Проведенные ранее исследования позволили определить предельные (максимально возможные) скорости и ускорения легковых автомобилей, определяемых сцеплением ведущих колес с дорогой, однако без учета подъемной (прижимающей) аэродинамической силы. Влияние этой силы на предельные динамические показатели автомобиля будет особенно значимо при высоких скоростях его движения.

Переднеприводные автомобили с расположением двигателя спереди характеризуются компактностью силового агрегата и резко выраженной недостаточной поворачиваемостью, что делает движение автомобиля с высокой скоростью более безопасным [1]. Однако в режиме разгона происходит снижение величины нормальных реакций на передних ведущих колесах, что влечет за собой ухудшение предельных динамических показателей переднеприводных автомобилей.

В настоящей статье определены предельные динамические показатели переднеприводных легковых автомобилей с учетом подъемной (прижимающей) аэродинамической силы.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [2, 3] определены потенциальные динамические характеристики автомобиля со всеми ведущими колесами по условию реализации предельных сил сцепления ведущих колес с дорогой. Максимально возможное ускорение автомобиля [2]

$$\dot{V}_a = \varphi_{x\max} \cdot g - \frac{k \cdot F}{m_a} \cdot V_a^2, \quad (1)$$

где V_a , \dot{V}_a – линейные ускорения и скорость автомобиля; $\varphi_{x\max}$ – максимальный касательный коэффициент сцепления колес с дорогой; g – ускорение свободного падения, $g=9,81\text{ м/с}^2$; F – площадь лобового сечения (мидель) автомобиля; m_a – общая масса автомобиля; k – коэффициент сопротивления воздуха,

$$k = \frac{c_x}{2} \cdot \rho; \quad (2)$$

c_x – коэффициент лобового аэродинамического сопротивления (коэффициент обтекаемости); ρ – плотность воздуха. В работе [3] определена максимально возможная линейная скорость автомобиля

$$V_{\text{анред}} = \sqrt{\frac{m_a \cdot g \cdot \varphi_{x\max}}{k \cdot F}}. \quad (3)$$

Однако в указанных работах [2, 3] не определены предельные динамические показатели легковых автомобилей, имеющих не все ведущие колеса, что в свою очередь осуществлено в работах [4, 5].

В работе [5] с учетом уточнения точки приложения тяговой силы (согласно рекомендациям работы [6]) определены предельные динамические показатели переднеприводных и заднеприводных легковых автомобилей такие как предельное по условию сцепления передних ведущих колес с дорогой ускорение переднеприводного автомобиля

$$\dot{V}_{a\text{ перед}} = g \cdot \varphi_{x\text{ max}} \cdot \frac{\frac{b}{L} - \frac{a}{L} \cdot \frac{f}{\varphi_{x\text{ max}}} + f \cdot \frac{r_{\partial 1} - r_{\partial 2}}{L} - \frac{k \cdot F \cdot V_a^2}{m_a \cdot g \cdot \varphi_{x\text{ max}}} \cdot \left[1 + f \cdot \frac{h_w - r_{\partial 2}}{L} + \varphi_{x\text{ max}} \cdot \frac{h_w - r_{\partial 1}}{L} \right]}{1 + f \cdot \frac{h - r_{\partial 2}}{L} + \varphi_{x\text{ max}} \cdot \frac{h - r_{\partial 1}}{L}}, \quad (4)$$

где a – расстояние от передней оси до проекции центра масс на горизонтальную плоскость; b – расстояние от задней оси до проекции центра масс автомобиля на горизонтальную плоскость; L – продольная колесная база автомобиля; h – высота центра масс автомобиля; h_w – высота центра парусности автомобиля относительно опорной поверхности; $r_{\partial 1}$ – динамический радиус передних (ведущих) колес; $r_{\partial 2}$ – динамический радиус задних (ведомых) колес; f – коэффициент сопротивления качению колес.

А также предельная по условию сцепления передних ведущих колес с дорогой скорость автомобиля

$$V_{a\text{ перед}} = \sqrt{\frac{m_a \cdot g \cdot \varphi_{x\text{ max}} \cdot \frac{\frac{b}{L} - \frac{a}{L} \cdot \frac{f}{\varphi_{x\text{ max}}}}{k \cdot F} \cdot \frac{1}{1 + (\varphi_{x\text{ max}} + f) \cdot \frac{h - r_{\partial 1}}{L}}}}. \quad (5)$$

Однако, в работе [5] не учтено влияние подъемной (прижимающей) аэродинамической силы автомобиля. Подъемная сила (вертикальная составляющая аэродинамической силы) определяется по формуле [7]

$$P_{wz} = \frac{c_z}{2} \cdot \rho \cdot V_a^2 \cdot F, \quad (6)$$

где c_z – коэффициент подъемной силы.

Коэффициент аэродинамического сопротивления k_z будет определяться как

$$k_z = \frac{c_z}{2} \cdot \rho. \quad (7)$$

Тогда выражение (6) с учетом (7) примет вид,

$$P_{wz} = k_z \cdot F \cdot V_a^2. \quad (8)$$

Цель и постановка задач исследования. Целью исследования является определение предельных по условию сцепления ведущих колес с дорогой динамических показателей переднеприводных легковых автомобилей с учетом подъемной (прижимающей) аэродинамической силы.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить предельное по условию сцепления передних ведущих колес с дорогой ускорение переднеприводного автомобиля;
- определить предельную по условию сцепления передних ведущих колес с дорогой скорость автомобиля.

Изложение основного материала. Предельные динамические показатели переднеприводных легковых автомобилей с учетом подъемной аэродинамической силы.

На рис. 1 приведена схема сил, действующих на переднеприводный автомобиль, движущийся в режиме разгона с учетом действия подъемной аэродинамической силы. На схеме (рис. 1) в качестве примера показана компоновка автомобиля Renault с двигателем, расположенным впереди, и передними ведущими колесами [8].

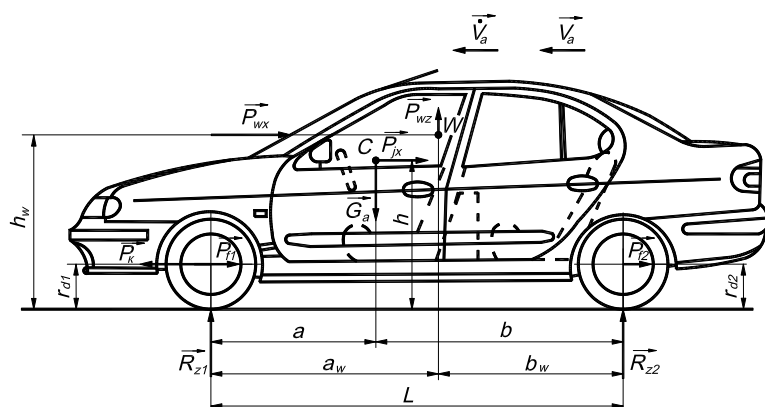


Рис. 1. Схема сил, действующих на переднеприводный автомобиль в тяговом режиме движения (при разгоне) с учетом подъемной аэродинамической силы

Уравнение поступательного движения автомобиля (уравнение тяговой динамики) имеет следующий вид

$$m_a \cdot \dot{V}_a = P_k - P_f - P_w, \quad (9)$$

где P_k – тяговая сила автомобиля; P_f – суммарная сила сопротивления качению всех колес автомобиля, которая с учетом подъемной силы (8) определяется как

$$P_f = P_{f1} + P_{f2} = (G_a - P_{wz}) \cdot f = (m_a \cdot g - k_z \cdot F \cdot V_a^2) f; \quad (10)$$

P_{f1} ; P_{f2} – суммарные силы сопротивления качению колес передней и задней осей автомобиля, соответственно; G_a – общий вес автомобиля; P_w – горизонтальная составляющая силы аэродинамического сопротивления,

$$P_w = k \cdot F \cdot V_a^2. \quad (11)$$

Суммарная нормальная реакция дороги на колесах передней оси с учетом действия подъемной силы определяется из условия равенства нулю суммы моментов сил, действующих относительно оси задних колес

$$R_{z1} = m_a \cdot g \cdot \frac{b}{L} - P_{jx} \cdot \frac{h - r_{d2}}{L} - P_{wx} \cdot \frac{h_w - r_{d2}}{L} - P_{wz} \cdot \frac{b_w}{L} + (P_k - P_{f1}) \cdot \frac{r_{d1} - r_{d2}}{L}, \quad (12)$$

где b_w – расстояние от задней оси до проекции центра парусности автомобиля на горизонтальную плоскость; P_{jx} – сила инерции поступательного движения автомобиля,

$$|P_{jx}| = m_a \cdot \dot{V}_a. \quad (13)$$

Предельные динамические показатели автомобиля (тяговая сила и ускорение) реализуются при равенстве суммарной касательной реакции R_{x1} на ведущих колесах предельной силе по сцеплению $\varphi_{x\max} \cdot R_{z1}$. В этом случае предельная суммарная тяговая сила

$$P_{k\text{пред}} = \varphi_{x\max} \cdot R_{z1} + P_{f1} = (\varphi_{x\max} + f) \cdot R_{z1}, \quad (14)$$

Умножив левую и правую части уравнения (12) на $(\varphi_{x\max} + f)$ и учитывая соотношения (9) и (13) определим предельную по условию сцепления передних ведущих колес с дорогой тяговую силу с учетом действия подъемной аэродинамической силы

$$P_{k_{перед}} = m_a \cdot g \cdot (\varphi_{x_{max}} + f) \times \frac{\frac{b}{L} + f \cdot \frac{h - r_{\delta 2}}{L} - \frac{F \cdot V_a^2}{m_a \cdot g} \cdot \left(k_z \cdot \left(\frac{b_w}{L} + f \cdot \frac{h - r_{\delta 2}}{L} \right) + k_x \cdot \frac{h_w - h}{L} \right)}{1 + f \cdot \frac{h - r_{\delta 2}}{L} + \varphi_{x_{max}} \cdot \frac{h - r_{\delta 1}}{L}} \quad (15)$$

Подставляя выражение для $P_{k_{перед}}$ в уравнение (9), учитывая соотношения (11) и (10) и принимая в них, что $P_w = P_{wx}$, а $k = k_x$, определим предельное по условию сцепления передних ведущих колес с дорогой ускорение автомобиля с учетом действия подъемной аэродинамической силы

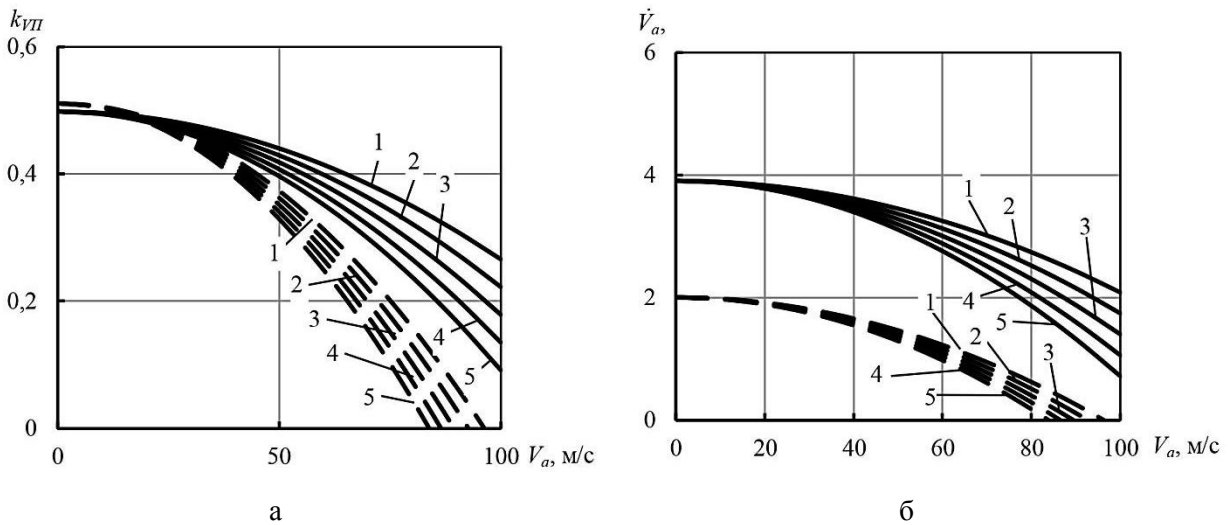
$$\dot{V}_{a_{перед}} = g \cdot \varphi_{x_{max}} \cdot \frac{\frac{b}{L} - \frac{a}{L} \cdot \frac{f}{\varphi_{x_{max}}} + f \cdot \frac{r_{\delta 1} - r_{\delta 2}}{L} - \frac{F \cdot V_a^2}{m_a \cdot g \cdot \varphi_{x_{max}}} \times \left[k_z \cdot \left(\varphi_{x_{max}} \cdot \frac{b_w}{L} - \right. \right.}{1 + f \cdot \frac{h - r_{\delta 2}}{L} + \varphi_{x_{max}} \cdot \frac{h - r_{\delta 1}}{L}} - f \cdot \left. \left. \left(\frac{a_w}{L} - \varphi_{x_{max}} \cdot \frac{r_{\delta 1} - r_{\delta 2}}{L} \right) \right] + k_x \cdot \left[1 + f \cdot \frac{h_w - r_{\delta 2}}{L} + \varphi_{x_{max}} \cdot \frac{h_w - r_{\delta 1}}{L} \right]}{\quad}, \quad (16)$$

где a_w – расстояние от передней оси до проекции центра парусности автомобиля на горизонтальную плоскость.

Коэффициент влияния скорости движения на предельное ускорение переднеприводного автомобиля будет равен

$$k_{VII} = \frac{\dot{V}_{a_{перед}}}{g \cdot \varphi_{x_{max}}} = \frac{\frac{b}{L} - \frac{a}{L} \cdot \frac{f}{\varphi_{x_{max}}} + f \cdot \frac{r_{\delta 1} - r_{\delta 2}}{L} - \frac{F \cdot V_a^2}{m_a \cdot g \cdot \varphi_{x_{max}}} \times \left[k_z \cdot \left(\varphi_{x_{max}} \cdot \frac{b_w}{L} - \right. \right.}{1 + f \cdot \frac{h - r_{\delta 2}}{L} + \varphi_{x_{max}} \cdot \frac{h - r_{\delta 1}}{L}} - f \cdot \left. \left. \left(\frac{a_w}{L} - \varphi_{x_{max}} \cdot \frac{r_{\delta 1} - r_{\delta 2}}{L} \right) \right] + k_x \cdot \left[1 + f \cdot \frac{h_w - r_{\delta 2}}{L} + \varphi_{x_{max}} \cdot \frac{h_w - r_{\delta 1}}{L} \right]}{\quad}, \quad (17)$$

На рис. 2а приведены графики зависимости коэффициента k_{VII} от скорости с учетом действия



1 – при $k_z = -0,2$; 2 – при $k_z = -0,1$; 3 – при $k_z = 0$; 4 – при $k_z = 0,1$; 5 – при $k_z = 0,2$
 — при $\varphi_{x_{max}} = 0,8$; - - - - при $\varphi_{x_{max}} = 0,4$

Рис. 2. Графики зависимости $k_{VII}(V_a)$ (а) и $V_{a_{перед}}(V_a)$ (б) для переднеприводного автомобиля Renault при полной загрузке при различных значениях k_z

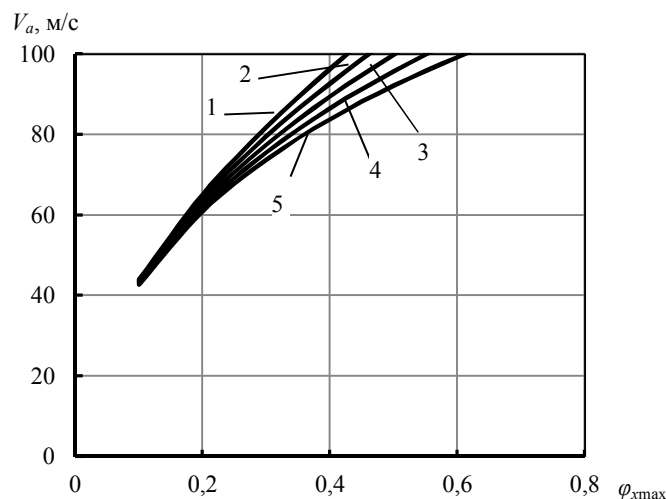
подъемной аэродинамической силы для переднеприводного легкового автомобиля Renault, имеющего $L = 2,441$ м; $k = 0,23$ Н·с²/м⁴; $r_{\partial 2} = 0,287$ м, $F = 2,111$ м² и параметры при полной загрузке $m_a = 1330$ кг; $a/L = 0,45$; $b/L = 0,55$; $h/L = 0,24$. Принято $f = 0,014$.

На рис. 26 приведены графики зависимости предельного ускорения $V_{a \text{ перед}}$ переднеприводного легкового автомобиля Renault при полной загрузке от скорости V_a с учетом действия подъемной аэродинамической силы.

Предельная по условию сцепления передних ведущих колес с дорогой скорость автомобиля реализуется при $k_{III} = 0$. Из уравнения (17) определим предельную скорость переднеприводного автомобиля с учетом действия подъемной аэродинамической силы

$$V_{a \text{ перед}} = \sqrt{\frac{m_a \cdot g \cdot \varphi_{x \text{ max}} \cdot \left(\frac{b}{L} - \frac{a}{L} \cdot \frac{f}{\varphi_{x \text{ max}}} + f \cdot \frac{r_{\partial 1} - r_{\partial 2}}{L} \right)}{F \cdot k_z \cdot \left(\varphi_{x \text{ max}} \cdot \frac{b_w}{L} - f \cdot \left(\frac{a_w}{L} - \varphi_{x \text{ max}} \cdot \frac{r_{\partial 1} - r_{\partial 2}}{L} \right) \right)} + F \cdot k_x \cdot \left(1 + f \cdot \frac{h_w - r_{\partial 2}}{L} + \varphi_{x \text{ max}} \cdot \frac{h_w - r_{\partial 1}}{L} \right)} \quad (18)$$

Графики зависимости предельной по условию сцепления передних ведущих колес с дорогой скорости автомобиля от максимального касательного коэффициента сцепления колес с дорогой, построенные с использованием формулы (18) приведены на рис. 3.



1 – при $k_z = -0,2$; 2 – при $k_z = -0,1$; 3 – при $k_z = 0$; 4 – при $k_z = 0,1$; 5 – при $k_z = 0,2$

Рис. 3. График зависимости $V_{a \text{ перед}}(\varphi_{x \text{ max}})$ для переднеприводного автомобиля Renault при полной загрузке при различных значениях k_z

Выводы. Учет действия подъемной аэродинамической силы позволяет повысить точность определения предельных по сцеплению ведущих колес с дорогой скорости и ускорения автомобиля. Полученные аналитические выражения позволяют производить оценку предельных по сцеплению ведущих колес с дорогой динамических показателей переднеприводных легковых автомобилей.

1. Родионов В.Ф. Проектирование легковых автомобилей / В.Ф. Родионов, Б.М. Фиштерман. – М.: Машиностроение, 1980. – 479 с.
2. Карпенко В.А. Оценка потенциальных динамических характеристик автомобилей / В.А. Карпенко // Автомобильный транспорт. Сборник научных трудов. – Харьков: ХГАДТУ, 1998. – Вып.1 – С. 64-67.
3. Файст В.Л. Удосконалення вимог до динамічних властивостей легкових автомобілів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.20 “Експлуатація та ремонт засобів транспорту” / В.Л. Файст. – Харків, 2012. – 20 с.
4. Динамика автомобиля / [Подригало М.А., Волков В.П., Бобошко А.А., Павленко В.А., Файст В.Л., Клец Д.М., Редько В.В.], под. ред. М.А. Подригало. – Харьков: Изд-во ХНАДУ, 2008. – 424 с.
5. Подригало М.А. Определение предельных динамических показателей легковых автомобилей / М.А.

Подригало, Д.В. Абрамов // Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 1. – С. 81 – 91.

6. Подригало М.А. Качение автомобильного колеса и определение понятия “Тяговая сила” / М.А. Подригало // Автомобильная промышленность, 2007.– №1. – с. 25-26.

7. Авершин А.Г. Аэродинамическое совершенствование заднего диффузора гоночного автомобиля формулы 1600 / А.Г. Авершин, Ю.В. Стародубцев // Автомобильный транспорт / Сб. научн. тр. Харьков: ХНАДУ. – 2010. – Вып. 2.– С. 35-41.

8. Голомидов А.М. Автомобили с приводом на передние колеса / А.М. Голомидов. – М.: Машиностроение, 1972. – 96 с.

REFERENCES

1. Rodionov, V. & Fishterman, B. (1980). *Designing of cars. [Proektirovanie legkovih avtomobiley]*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 479 p.

2. Karpenko, V. (1998). Evaluation of potential vehicle dynamics specifications. [Otcenka potencial'nih dinamicheskikh harakteristik avtomobiley]. *Automobile transport. [Avtomobil'niy transport. Sbornik nauchnih trudov]*. Vol. 1. Kharkiv, KhGADTU Publ., pp. 64-67.

3. Fayst, V. (2012). *Improving the requirements for dynamic properties of cars*. Synopsis of Ph.D. Diss. [Udoskonalennya vimog do dinamichnih vlastivostey legkovih avtomobiliv. Avtoref. Ph.D. diss.]. Kharkiv, 20 p.

4. Podrigalo, M., Volkov, V., Boboshko, A., Pavlenko, V., Fayst, V., Kletc, D. & Red'ko V. (2008). *Vehicle dynamics. [Dinamika avtomobilya]*. Kharkiv, KhNADU Publ., 424 p.

5. Podrigalo, M. & Abramov, D. (2013). Defining the limit dynamic indicators of cars. [Opredelenie predel'nih dinamicheskikh pokazateley legkovih avtomobiley]. *Mechanics and Mechanical Engineering. [Mehanika ta mashinobuduvannya. Naukovo-tehnichniy jurnal]*. Vol. 1. Kharkiv, NTU «HPI» Publ., pp. 81-91.

6. Podrigalo, M. (2007). Rolling of car wheel and the definition of "Pulling Force". [Kachenie avtomobilnogo kolesa i opredelenie ponyatiya “Tyagovaya sila”]. *Automobile industry. [Avtomobil'naya promishlennost]*. Vol. 1. Kharkiv, NTU “KhPI” Publ., pp. 25-26.

7. Avershin, A. & Starodubcev, Yu. (2010). Aerodynamic improvement of the rear diffuser Formula 1600 race car. [Aerodinamicheskoe sovershenstvovanie zadnego difuzora gonochnogo avtomobilya formuli 1600]. *Automobile transport. [Avtomobil'niy transport. Sbornik nauchnih trudov]*. Vol. 2. Kharkiv, KhNADU Publ., pp. 35-41.

8. Golomidov, A. (1972). *Vehicles with front-wheel drive. [Avtomobili s privodom na perednie kolesa]*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 96 p.

Абрамов Д.В. Граничні динамічні показники передньопривідних легкових автомобілів з урахуванням підйомної аеродинамічної сили.

У даній статті визначено граничні за умовою зчеплення ведучих коліс з дорогою динамічні показники передньопривідних автомобілів з урахуванням підйомної аеродинамічної сили, динамічного перерозподілу нормальних реакцій між колесами передньої і задньої осей автомобіля.

Ключові слова: граничне прискорення, гранична швидкість, підйомна аеродинамічна сила, передньопривідний автомобіль.

D. Abramov. Limit dynamic performance front-wheel drive cars with considering of lift aerodynamic force.

This article defines the limit by the condition of the clutch wheels with the road dynamic performance front-wheel drive cars with considering of lift aerodynamic force, dynamic redistribution of normal reactions between the wheels of the front and rear axles of vehicle.

Keywords: acceleration limit, speed limit, lifting aerodynamic force, front-wheel drive car.

АВТОР:

АБРАМОВ Дмитро Володимирович, кандидат технічних наук, докторант кафедри «Технології машинобудування і ремонту машин» Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: varan_mail@ukr.net

AUTHOR:

Dmitry ABRAMOV, Ph.D. in Engineering, Doctoral student of the Department "Technology of mechanical engineering and repair of machines", Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: varan_mail@ukr.net

РЕЦЕНЗЕНТИ:

АРТЬОМОВ Микола Петрович, доктор технічних наук, професор кафедри «Тракторів і автомобілів», Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка, Харків, Україна.

САХНО В. П., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри «Автомобілі», м. Київ, Україна.

REVIEWERS:

Nikolay ARTEMOV, Doctor of Science in Engineering, Professor of the Department "Tractors and cars", Kharkov National Technical University of Agriculture them. Peter Vasilenko, Kharkiv, Ukraine.

Volodymyr SAKHNO, Doctor of Science in Engineering, Professor, National Transport University, Head of Automobiles Department, Kyiv, Ukraine.

Стаття надійшла в редакцію 18.05.2015р.