

Научная статья

УДК 629.3-531.24

Определение центра масс легкового автомобиля ВАЗ-21713

Михаил Павлович Малиновский¹, Андрей Анатольевич Фёдоров²,
Александр Николаевич Альбицкий³

^{1,2,3} Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹ ntbmadi@gmail.com

² mistr@list.ru

³ albitckiy@gmail.com

Аннотация. Тормозная эффективность является одним из важнейших эксплуатационных свойств для любого транспортного средства. На двухосный легковой автомобиль при торможении на горизонтальной поверхности действуют сила тяжести и противодействующие ей вертикальные реакции в точках контакта колёс с опорной поверхностью, искусственное сопротивление движению, то есть тормозные усилия, сила аэродинамического сопротивления, сила сопротивления качению, трение в ступичных подшипниках, а также сила инерции, противодействующая суммарной силе сопротивления. При торможении на уклоне к перечисленным силам добавляется продольная составляющая от силы тяжести. Под действием силы инерции происходит перераспределение вертикальных реакций в сторону передней оси, которое в значительной степени зависит от расположения центра масс автомобиля. При наличии паспортных данных продольная координата центра масс элементарно определяется, исходя из распределения полной и снаряжённой массы по осям, однако для легкового автомобиля ВАЗ-21713 с кузовом типа «универсал» такие данные отсутствовали. Поэтому авторами было принято решение установить соотношение веса между передней и задней осями экспериментально-расчётным методом. Высота центра масс была определена расчётным методом с элементами твердотельного трёхмерного моделирования на основе массово-габаритных характеристик отдельных узлов и агрегатов. При этом принималось допущение, что центр тяжести каждого массового элемента автотранспортного средства находится в его геометрическом центре. Полученные координаты центра масс автомобиля позволили провести проекторочный расчёт тормозных механизмов и поверочный расчёт тормозной эффективности.

Ключевые слова: легковой автомобиль; Лада Приора; форсирование двигателя; гидравлический тормозной привод; центр тяжести; перераспределение веса при торможении.

Для цитирования: Малиновский М.П., Фёдоров А.А., Альбицкий А.Н.

Определение центра масс легкового автомобиля ВАЗ-21713 // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №4 (38).

Original article

Determination of the mass center of a passenger car VAZ-21713

Mikhail P. Malinovsky¹, Andrej A. Fedorov², Aleksandr N. Albitckiy³

^{1,2,3}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

¹ntbmadi@gmail.com

²mistr@list.ru

³albitckiy@gmail.com

Abstract. Braking performance is one of the most important performance properties for any vehicle. When braking on a horizontal surface, a two-axle passenger car is subject to the force of gravity and counteracting vertical reactions at the points of contact of the wheels with the supporting surface, artificial resistance to movement, that is, braking forces, aerodynamic drag force, rolling resistance force, friction in wheel bearings, as well as force inertia counteracting the total resistance force. When braking on a slope, a longitudinal component from gravity is added to the listed forces. Under the influence of inertial force, a redistribution of vertical reactions occurs towards the front axle, which largely depends on the location of the vehicle's center of mass. If passport data is available, the longitudinal coordinate of the center of mass is simply determined based on the distribution of the total and curb weight along the axes, however, for the VAZ-21713 passenger car with a station wagon body, such data was not available. Therefore, the authors decided to establish the weight ratio between the front and rear axles using an experimental and calculation method. The height of the center of mass was determined by a calculation method with elements of solid-state three-dimensional modeling based on the mass and dimensional characteristics of individual components and assemblies. In this case, the assumption was made that the center of gravity of each mass element of the vehicle is located at its geometric center. The obtained coordinates of the vehicle's center of mass allowed us to carry out a design calculation of the brake mechanisms and a verification calculation of the braking efficiency.

Keywords: passenger car; Lada Priora; boosting the engine; hydraulic brake drive; center of gravity; weight redistribution during braking.

For citation: Malinovsky M.P., Fedorov A.A., Albitckiy A.N. Determination of the mass center of a passenger car VAZ-21713. Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura. 2023. №4 (38).

Введение и постановка задачи

Улучшение мощностных характеристик серийно выпускаемых двигателей является актуальной задачей для отечественного автоспорта. Доработка двигателя может предусматривать такие варианты форсирования, как «увеличение степени сжатия, увеличение рабочего объема двигателя, уменьшение механических потерь, оптимизация процессов горения смеси, увеличение наполнения цилиндров» [1], «оптимизация работы шатунно-поршневой группы и кривошипно-шатунного механизма, системы питания двигателя, системы впуска топливно-воздушной смеси, системы выпуска отработавших газов» [2]. Перечисленные изменения позволяют увеличить на 70 л.с. литровую мощность двигателя ВАЗ-21126, дебютировавшего на автомобиле «Лада Приора» в 2007 г. и впоследствии применявшегося на моделях «Калина» и «Гранта», повысить его максимальную эффективную мощность на 112 л.с. и максимальный эффективный крутящий момент на 65 Нм по сравнению с заводской внешней скоростной характеристикой [3]. Недостатком является смещение её экстремумов в область более высокой частоты вращения коленчатого вала, вследствие чего расход топлива увеличивается относительно базового [4] (повышение составляет около 1...2 л на 100 км) и возникает вопрос о его соответствии Методическим рекомендациям согласно распоряжению Министерства транспорта РФ № АМ-23-р от 14.08.2008 [5]. Кроме того, требуется перенастройка существующих алгоритмов, заложенных в электронную систему управления двигателем (ЭСУД) [6].

При форсировании двигателя неизбежно возникает необходимость в увеличении тормозной эффективности и совершенствовании тормозной системы. На двухосный одиночный легковой автомобиль, тормозящий на уклоне, в общем случае действуют следующие силы:

- сила тяжести $G = m_a \cdot g$;
- вертикальные реакции на осях N_1, N_2 ;
- тормозные усилия P_{m1}, P_{m2} ;

- сила аэродинамического сопротивления P_w ;
- сила сопротивления качению P_f ;
- сила трения в ступичных подшипниках P_b ;
- сила инерции $P_j = m_a \cdot d$.

При торможении на спуске продольная составляющая силы тяжести негативно сказывается на тормозной эффективности. Аэродинамическое сопротивление определяется коэффициентом C_x , который у автомобиля «Лада Приора» составляет 0,32 и 0,34 для кузова «седан» и «универсал» соответственно [7]. Силы сопротивления качению и аэродинамического сопротивления, а также трение в ступичных подшипниках при проектировочных расчётах часто не учитывают, так как они, во-первых, способствуют увеличению замедления, а, во-вторых, уменьшаются по мере снижения скорости. После полной блокировки колёс сопротивление качению вообще отсутствует. Чтобы определить вертикальные реакции, составляют систему уравнений для моментов относительно точек контакта колёс каждой оси с поверхностью дороги:

$$\begin{cases} M_1 = G \cdot \cos \psi \cdot \ell_1 - N_2 L + G \cdot \sin \psi \cdot h_y - m_a dh_y = 0 \\ M_2 = G \cdot \cos \psi \cdot \ell_2 - N_1 L - G \cdot \sin \psi \cdot h_y + m_a dh_y = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где ψ – угол продольного уклона, рад;

$\ell_1, \ell_2 = L - \ell_1$ – расстояние до центра масс автомобиля от передней и задней оси соответственно, м;

h_y – высота центра масс автомобиля, м;

d – замедление, м/с².

При анализе системы уравнений (1) становится очевидным, что перераспределение вертикальных реакций на колёсах под действием силы инерции в сторону передней оси существенно зависит от продольной и вертикальной координат центра масс автомобиля. В свою очередь, вертикальные реакции влияют на сцепные свойства шин [8], эффективность различных систем активной безопасности, таких как антиблокировочная

система [9], электронный контроль устойчивости [10] и опережающая система экстренного торможения [11], а также величину давления, действующего на дорожное покрытие [12], и динамику процесса преодоления ступенчатого препятствия [13]. Кроме того, расположение центра масс автомобиля влияет на управляемость [14] и курсовую устойчивость [15], а также на дифферент кузова при торможении [16] и его крен при криволинейном движении [17]. Целью настоящего исследования являлось определение координат центра масс легкового автомобиля на примере ВАЗ- 21713 «Лада Приора» с кузовом типа «универсал».

Взвешивание автомобиля ВАЗ-21713

Из системы уравнений (1) следует, что расположение центра тяжести в статике, то есть при отсутствии замедления d , можно элементарно определить, зная распределение массы на переднюю и заднюю оси. Традиционно указанные параметры приводятся в руководстве по эксплуатации, прилагаемом заводом-изготовителем к автомобилю, или в справочной литературе. Однако для ВАЗ-2171 и его модификаций распределение по осям ни полной, ни снаряжённой массы в открытых источниках обнаружить не удалось, в связи с чем было принято решение установить распределение массы по колёсам экспериментальным путём. Для взвешивания (рис. 1) применили автомобильные весы Intercomp SW500 E-Z Weigh Scale грузоподъёмностью 2800 кг (в стандартном режиме) с ценой деления 0,5 кг.



Рис. 1. Взвешивание автомобиля ВАЗ-21713

Замеры проводились при полном топливном баке для трёх случаев:

- опыт № 1 – частичная загрузка;
- опыт № 2 – водитель + груз;
- опыт № 3 – водитель + передний пассажир + груз.

В результате замеров были получены данные о распределении экспериментальной массы m_3 по колёсам (рис. 2, табл. 1).



Рис. 2. Показания автомобильных весов (опыт №1 и №2)

Таблица 1

Результаты взвешивания автомобиля ВАЗ-21713

m, кг	Опыт №1			Опыт №2			Опыт №3		
	Лев.	Прав.	Σ	Лев.	Прав.	Σ	Лев.	Прав.	Σ
1 ось	345	325,5	670,5	368,5	336,5	705	381,5	360	741,5
2 ось	273	281	554	298	286	584	300	315	615
Σ	618	606,5	1224,5	666,5	622,5	1289	681,5	675	1356,5

Масса водителя и пассажира равнялась $m_{вод} = 64,5$ кг и $m_{пас} = 67,5$ кг соответственно. Стандартная масса человека приравнивается 75 кг, именно поэтому в свидетельстве о регистрации ВАЗ-21713 указывается 1163 кг, хотя согласно паспортным данным снаряжённая масса $m_c = 1088$ кг.

Величина частичной загрузки составила:

$$m_{част} = m_{31} - m_c = 1224,5 - 1088 = 136,5 \text{ кг.}$$

Частичная загрузка подразумевала наличие груза в багажнике: сапёрной лопаты и лопаты для снега, гидравлического домкрата, двух огнетушителей, запасных частей, комплекта резиновых ковриков,

солнцезащитная шторка на лобовое стекло, 4 банки омывательной жидкости, инструмента, 4 кг каменной соли для гололёда, 1 л тосола, 1 л моторного и 1 л трансмиссионного масла, 1 л тормозной жидкости. Суммарная масса груза составила около 50 кг. Кроме того, в салоне находились три массажных коврика и чехлы на сиденьях, литература в бардачке, видеорегиистратор, подушка под голову пассажира. Приблизительная оценка позволяет понять, что суммарная масса перечисленных предметов значительно меньше $m_{\text{част}}$. Поэтому невозможно сделать достоверное заключение о характере распределения частичной нагрузки по длине автомобиля.

Определение продольной координаты центра масс

На основании экспериментальных данных, полученных в результате взвешивания, был произведён расчёт продольной координаты центра масс автомобиля ВАЗ-21713. Для реализации большей тяговой силы, особенно при трогании с места, на переднеприводных автомобилях ВАЗ «используется поперечное расположение двигателя для увеличения нагрузки на передние ведущие колеса. Данное конструктивное решение позволило распределить нагрузку на передние и задние колеса в соотношении 50 на 50 процентов. Только в лучших образцах таких автомобилей было достигнуто соотношение 52 процента веса на передние колеса и 48 процентов – на задние» [19].

Уточнить координату центра тяжести водителя можно из разности экспериментальной массы в опытах № 1 и № 2:

$$m_{\text{э2}} \ell_{1\text{э2}} = m_{\text{э1}} \ell_{1\text{э1}} + m_{\text{вод}} (X_{\text{вод}} - L_{\text{св}}) ;$$

$$m_{\text{вод}} (X_{\text{вод}} - L_{\text{св}}) = m_{\text{э2}} \frac{m_{2\text{э2}}}{m_{\text{э2}}} L - m_{\text{э1}} \frac{m_{2\text{э1}}}{m_{\text{э1}}} L ;$$

$$X_{\text{вод}} = \frac{m_{2\text{э2}} - m_{2\text{э1}}}{m_{\text{вод}}} L + L_{\text{св}} = \frac{584 - 554}{64,5} \cdot 2,492 + 0,86 = 2,019 \text{ м,}$$

где $L = 2,492$ м – колёсная база;

$L_{\text{св}} = 0,86$ м – длина переднего свеса.

Аналогично можно уточнить координату центра тяжести переднего пассажира из разности экспериментальной массы в опытах №2 и №3:

$$X_{nac} = \frac{m_{2э3} - m_{2э2}}{m_{nac}} L + L_{ce} = \frac{615 - 584}{67,5} \cdot 2,492 + 0,86 = 2,004 \text{ м.}$$

Распределение экспериментальной массы между передней и задней осями практически не зависело от наличия людей в салоне и составило 54,7:45,3 ± 0,1, что соответствует продольной координате:

$$X_{ц.м.э1} = \frac{m_{2э1}}{m_{э1}} L + L_{ce} = \frac{554}{1224,5} \cdot 2,492 + 0,86 = 1,987 \text{ м.} \quad (2)$$

Определение эксцентриситета центра масс

Эксцентриситет центра масс относительно продольной оси (принять положительным влево, то есть в сторону водителя), м:

$$E_i = B_i \left(\frac{m_{i.лев}}{m_i} - \frac{1}{2} \right), \quad (3)$$

где $B_1 = 1,41$ м, $B_2 = 1,38$ м – передняя и задняя колея (рис. 3).

В опыте № 1 соотношение масс между левым и правым бортами составило 50,5:49,5, а при наличии водителя в опыте № 2 увеличилось до 51,7:48,3. Значения эксцентриситета приведены в табл. 2.

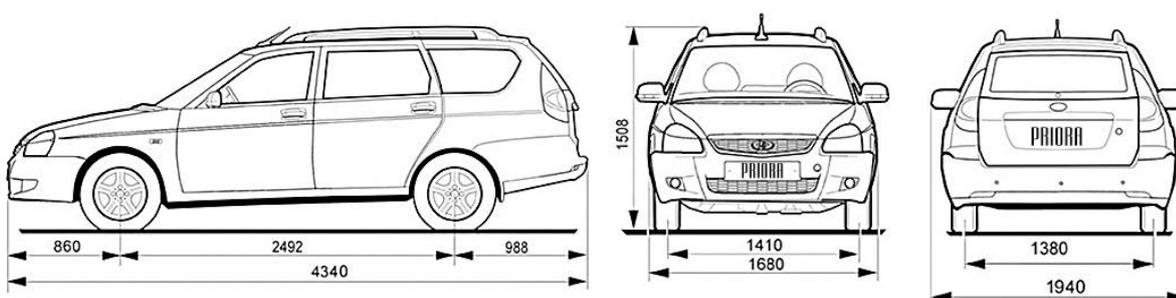


Рис. 3. Автомобиль ВАЗ-21713 «Лада Приора». Габаритные размеры

Таблица 2

Поперечный эксцентриситет центра масс ВАЗ-21713

Е, м	Опыт № 1	Опыт № 2	Опыт № 3
1 ось (E_1)	0,021	0,032	0,020
2 ось (E_2)	-0,010	0,014	-0,017

В ходе зимней эксплуатации автомобиля ВАЗ-21713 установлено, что при проскальзывании колёс во время разгона на скользком покрытии происходит снос передней оси **вправо**. Результаты опыта опровергают гипотезу, что причиной сноса является эксцентриситет центра масс, связанный с поперечным размещением двигателя.

Расчёт высоты центра полной массы

Лабораторные условия не позволили обеспечить достаточный продольный уклон автомобиля, чтобы вычислить высоту центра масс способом, рекомендуемым в инструкции к автомобильным весам. Поэтому для её определения был выбран апробированный ранее расчётный метод на основе массово-габаритных характеристик узлов и агрегатов, при этом считается, что центр тяжести каждого массового элемента совпадает с его геометрическим центром. При проектировании тормозных механизмов отталкиваются от полной массы автомобиля, достичь которую в ходе эксперимента было затруднительно. Тем более, что координаты центра полной массы существенно зависят от размещения полезной нагрузки. Между тем, при расчёте радиусов колёс, напрямую влияющих на высоту многих элементов, необходимо знать фактическое распределение полной массы по осям. Чтобы найти координаты геометрических центров массовых элементов, на габаритный чертёж автомобиля ВАЗ-21713 в системе автоматизированного проектирования «КОМПАС» были схематично нанесены наиболее крупные агрегаты (рис. 4).

Чтобы сохранить достоверность распределения экспериментальной массы по осям, полезная нагрузка не должна превышать:

$$m_{пол} = m_n - m_{э1} = 1593 - 1224,5 = 368,5 \text{ кг},$$

где $m_n = 1593$ кг – паспортная полная масса ВАЗ-21713.

Соответственно, рассмотрим два варианта полезной загрузки:

1) водитель $m_{чел.п} = 75$ кг + груз $m_{гр} = 293,5$ кг в центре багажника;

2) водитель и передний пассажир $m_{чел.п} = 150$ кг + два задних пассажира

$m_{чел.з} = 150$ кг + груз $m_{гр} = 68,5$ кг.

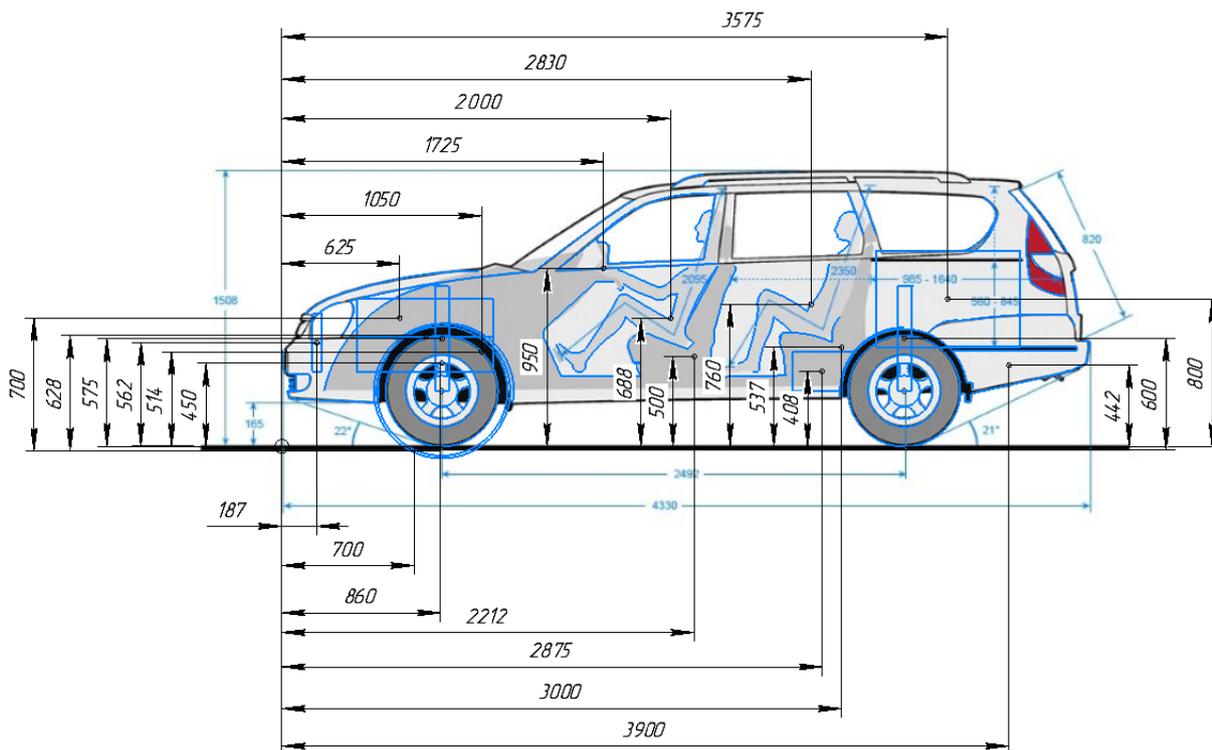


Рис. 4. Расчётная схема центра масс ВАЗ-21713

Координаты составляющих полезной нагрузки приведены в табл. 3. Теоретическая продольная координата центра полной массы в общем случае определяется по формуле, м:

$$X_{ц.м.н} = \frac{m_{эл} \cdot X_{ц.м.эл} + m_{чел.н} \cdot X_{чел.н} + m_{чел.з} \cdot X_{чел.з} + m_{сп} X_{сп}}{m_n} \quad (4)$$

Распределение полной массы по осям, кг:

$$m_{n2} = m_n \frac{(X_{ц.м.н} - L_{св})}{L}; \quad m_{n1} = m_n - m_{n2} \quad (5-6)$$

Итоги сравнения результатов расчёта полной массы и её распределения по осям с опытом №1 приведены в табл. 4.

В руководстве по эксплуатации к ВАЗ-21713 имеются сведения только о заправочных объёмах (табл. 5). Ввиду отсутствия официальных данных о массе узлов и агрегатов ВАЗ-21713, информацию пришлось искать в открытых источниках сети Интернет.

Таблица 3

Координаты полезной нагрузки

Обозн.	Элемент	m_u , кг (B1)	m_u , кг (B2)	X, м	Z, м
$m_{чел.п}$	Водитель + передний пассажир	75	$2 \cdot 75 = 150$	2,0	0,688
$m_{чел.з}$	Два задних пассажира	0	$2 \cdot 75 = 150$	2,83	0,76
$m_{гр}$	Груз (в центре багажника)	293,5	68,5	3,575	0,8

Таблица 4

Распределение полной массы ВАЗ-21713 по осям

Параметр	Вариант №1	Вариант №2	Опыт №1
m_1 , кг	684,9	777,2	670,5
m_2 , кг	908,1	815,8	554
$m_1:m_2$	43:57	48,8:51,2	54,8:45,2
l_1 , м	1,421	1,276	1,127

Таблица 5

Заправочные объёмы ВАЗ-21713

Обозн.	Элемент	V_u , л	ρ , кг/м ³
$V_{тб}$	Топливный бак	43+1	780
$V_{см}$	Система смазки ДВС (Mobil 1 5W-40)	3,5	850
$V_{охл}$	Система охлаждения ДВС и отопления салона	$7,84 - 2,3 = 5,54$	1073
$V_{рад}$	Радиатор	2,3	1073
$V_{кп}$	Коробка передач (Лукойл ТМ 4)	3,1	880

В первом приближении изменение координат подрессоренных масс в зависимости от деформации шин и подвески не учитывается.

Геометрический центр кузова был определён средствами «КОМПАС-3D» (рис. 5).

В таблице 6 приведены величины массовых элементов m_u , а также их продольные X_u (от переднего бампера) и вертикальные Z_u координаты.

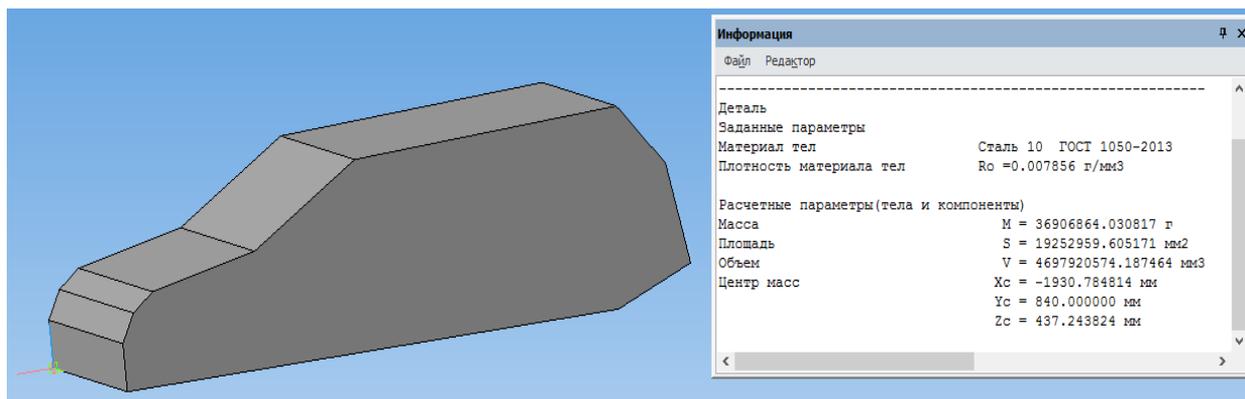


Рис. 5. Расчёт центра масс кузова в системе «КОМПАС-3D»

Таблица 6

Координаты подрессоренных массовых элементов

Обозн.	Элемент	$m_{д.лм}, кг$	X, м	Z, м
$m_{куз}$	Кузов ($\pm 15\%$)	360	1,93	0,6
$m_{сид}$	Переднее сиденье	$2 \cdot 14,5 = 29$	2,212	0,5
$m_{див}$	Задний диван (аналогично ВАЗ-2108)	22	3	0,537
$m_{стп.п}$	Стеклоподъёмники: передние	$2 \cdot 3,81 = 7,62$	2,0	
$m_{стп.з}$	задние	$2 \cdot 3,81 = 7,62$	2,83	0,688
$m_{рк}$	Рулевое колесо ($d=0,378 м$)	2	1,725	0,95
$m_{д}$	Двигатель ВАЗ-21126	115	0,77	0,628
$m_{сц}$	Сцепление LUK	4,6		
$m_{кп}$	Коробка передач	32,7	0,77	0,45
$m_{ст}$	Стартер	3,9		
$m_{акб}$	Аккумуляторная батарея	12	0,625	0,7
$m_{рад}$	Радиатор 2,3 л	3,25	0,187	0,562
$m_{тб}$	Топливный бак 43 л	10	2,875	0,408
$m_{кз}$	Колесо в сборе 185/65R14 запасное	14	3,9	0,442
$m_{рм}$	Рулевая рейка	14,4	1,05	0,514

Координаты неподрессоренных масс будут определяться радиусом колёс (табл. 7). Справочные параметры шины 185/65R14 (КАМА-230):

– $m_{ш} = 7,2$ кг – масса бескамерной шины;

– $r_{св} = 0,298$ м – наружный (свободный) радиус;

– $r_{ст} = 0,27$ м – статический радиус при номинальной нагрузке

$m_{ном} = 530$ кг.

Координаты неподрессоренных массовых элементов

Обозн.	Элемент	$m_{ц.нм}, \text{ кг}$	X, м	Z, м
	Передняя ось:			
$m_{ам.п}$	Стойки передние (2 шт.)	10,5	0,86	0,575
$m_{к1}$	Колесо в сборе 185/65R14	$2*14=28$		
$m_{шрус.п}$	Привод переднего колеса с АБС: правый левый	6,83		
$m_{шрус.л}$		5,78		
$m_{шро}$	Шаровые опоры (2 шт.)	2,46		
$m_{ступ.п}$	Ступица передняя подшипник ступицы 256707	$2*1,137=2,274$ $2*0,542=1,084$		
$m_{дтм}$	Передний тормозной диск	$2*4=8$		
$m_{клд.п}$	Передние тормозные колодки (4 шт.)	1,02		
$m_{суп.л}$	Суппорт тормозной в сборе: левый правый	3,6		
$m_{суп.п}$		3,44		
	Задняя ось:			
$m_{ам.з}$	Амортизаторы задние (2 шт.)	4,56	3,352 =	0,6
$m_{к2}$	Колесо в сборе 185/65R14	$2*14=28$		
$m_{ступ.з}$	Ступица задняя подшипник	$2*2,8=5,6$ $2*0,444=0,888$		
$m_{бтм}$	Задние тормозные барабаны	$2,57*2=5,14$		
$m_{клд.з}$	Задние тормозные колодки (4 шт.)	2		
$m_{кц.з}$	Задний тормозной цилиндр	$2*0,38=0,76$		

Нормальная жёсткость шины, Н/м:

$$C_{uZ} = \frac{m_{nom}g}{r_{св} - r_{см}}. \quad (7)$$

Статический радиус колёс каждой оси, м:

$$r_{к.i} = r_{св} - \frac{m_{n.i}g}{k_{u.i}C_{uZ}}, \quad (8)$$

где $m_{n.i}$ – часть полной массы, приходящаяся на данную ось, кг;

$k_{u.i} = 2$ – число шин на данной оси.

Остаточная масса:

$$m_{ост} = m_c - m_{нм\Sigma} - m_{чм\Sigma} = 1088 - 119,936 - 686,525 = 281,539 \text{ кг}, \quad (9)$$

где $m_{нм\Sigma} = 119,936$ кг – суммарная поддрессоренная масса;

$m_{чм\Sigma} = 686,525$ кг – суммарная неподрессоренная масса.

Координаты центра суммы массовых элементов находятся по известным формулам, м:

$$X_{нм} = \frac{\sum(m_{нм.и} X_u)}{m_{нм\Sigma}}; X_{нм} = \frac{\sum(m_{нм.и} X_u)}{m_{нм\Sigma}}; \quad (10-11)$$

$$Z_{нм} = \frac{\sum(m_{нм.и} Z_u)}{m_{нм\Sigma}}; Z_{нм} = \frac{\sum(m_{нм.и} Z_u)}{m_{нм\Sigma}}. \quad (12-13)$$

Остаточная масса включает в себя такие элементы, как центральная консоль торпедо (0,45 кг), комбинацию приборов VDO K310 (0,8 кг), главный тормозной цилиндр 11180-3505010-82 ($V_{гтп} = 0,45$ л), бачок омывателя ($V_{омыв} = 2,5$ л).

По результатам взвешивания можно рассчитать совместную продольную координату центра остаточной и частичной масс:

$$X_{оч} = \frac{m_{эл} X_{цм.эл} - m_{нм\Sigma} X_{нм} - m_{нм\Sigma} X_{нм}}{m_{ост} + m_{част}} = 2,424 \text{ м},$$

где $X_{нм} = 1,748$ м, $X_{нм} = 1,835$ – продольная координата соответственно подрессоренной и неподрессоренной масс.

Тогда расстояние от передней оси до центра масс автомобиля, м:

$$\ell_{1p} = \frac{m_{нм\Sigma} X_{нм} + m_{нм\Sigma} X_{нм} + (m_{ост} + m_{част}) X_{оч} + m_{пол} X_{пол}}{m_n} - L_{св}. \quad (14)$$

Принимается допущение, что высота центра остаточной и экспериментальной масс находится посередине между габаритной высотой и дорожным просветом:

$$Z_{оч} = \frac{H_{габ} + H_{дп}}{2} = \frac{1,508 + 0,165}{2} = 0,8365 \text{ м}.$$

Высота центра масс полезной нагрузки, м:

$$Z_{пол} = \frac{m_{чел.н} Z_{чел.н} + m_{чел.з} Z_{чел.з} + m_{гр} Z_{гр}}{m_{чел.н} + m_{чел.з} + m_{гр}}. \quad (15)$$

Высота центра полной масс автомобиля, м:

$$h_y = \frac{m_{нм\Sigma} Z_{нм} + m_{нм\Sigma} Z_{нм} + (m_{ост} + m_{част}) Z_{оч} + m_{пол} Z_{пол}}{m_n}. \quad (16)$$

Расчёт потребного тормозного усилия

Эффективность рабочей тормозной системы автомобиля проверяется на горизонтальной поверхности ($\psi = 0$) под воздействием замедления d .

В этом случае нормальные реакции на осях равны, N :

$$N_{d1} = m_n \frac{g(L - \ell_{1p}) + dh_u}{L}; \quad N_{d2} = m_n \frac{g\ell_{1p} - dh_u}{L}. \quad (17-18)$$

Потребное тормозное усилие на каждом тормозном механизме, N :

$$[P_{mm.i}] \geq \frac{N_{di}}{k_{ui}} \cdot \frac{[d_p]}{g}, \quad (19)$$

где $[d_p] = 5,8 \text{ м/с}^2$ – норматив замедления для рабочей системы.

Расчётные координаты центра масс ВАЗ-21713 и потребные тормозные усилия приведены в табл. 8. Для проектирования тормозных механизмов принимается большее из полученных значений.

Таблица 8

Результаты расчётов

Обозн.	Параметр	Вар. № 1	Вар. № 2
ℓ_{1p}	Расстояние от передней оси до центра полной массы, м	1,421	1,276
$h_{ц}$	Высота центра полной массы, м	0,672	0,663
	Вертикальные реакции, N :		
N_{d1}	передние	9210,3	10081,6
N_{d2}	задние	6417,0	5545,7
	Потребные тормозные усилия, N :		
$[P_{TM1}]$	передние	2722,7	2980,3
$[P_{TM2}]$	задние	1897,0	1639,4

Выводы

1. Коэффициент сцепного веса (то есть нагрузка на передний ведущий мост) при изменении загрузки от снаряжённой массы до полной изменяется от 55 до 43%.

2. Способ загрузки при полной массе автомобиля несущественно влияет на высоту центра масс (в пределах 1...2 см).

3. Согласно [19], «высоту центра масс принимают равной высоте погрузочной площадки для грузовых автомобилей и диаметру колеса для легковых», то есть $d_{св}=0,596$ м. Расчётная высота центра полной массы автомобиля превысила данное значение на 11...12%.

Заключение

В ходе проведённых исследований разработана математическая модель, позволившая определить координаты центра масс легкового автомобиля для дальнейшего использования в проектировочных и поверочных расчётах тормозной системы, а также при настройке подвески спортивного автомобиля. Рядовые потребители часто заинтересованы в приобретении автомобилей с форсированными двигателями, в силу чего полученные расчёты могут быть полезны и при доработке обычного дорожного автомобиля.

Список источников

1. Кармышов, Д.Д. Исследование и разработка технологий по подготовке двигателей Российского производства к спортивным соревнованиям легковых автомобилей в классе Touring / Д.Д. Кармышов, В.А. Зенченко // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: сборник научных трудов, посвященный 85-летию кафедры ЭАТиС МАДИ, по материалам 79-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ. – 2021. – С. 152-158. – EDN: FPPFTK.
2. Пути увеличения мощности двигателя ВАЗ-21126, их влияние на ресурс и ремонтпригодность / А.И. Блудилин, В.В. Блудилина, В.Г. Дыгало, Л.В. Дыгало // Результаты современных научных исследований и разработок: материалы Международной (заочной) научно-практической конференции / под общ. ред. А.И. Вострецова. – 2017. – С. 28-36. – EDN: YOHSDX.
3. Автоматизация стендовых калибровочных испытаний автомобильного двигателя внутреннего сгорания / Евдонин Е.С., Душкин П.В., Кузьмин А.И., Ховренко С.С., Кремнев В.В. // Труды НАМИ. – 2021. – № 4 (287). – С. 12-21. – EDN: WAAIDG.
4. Эколого-энергетическая эффективность пассажирских услуг в мегаполисе / А.А. Чеботаев, Д.Б. Ефименко, А.М. Ивахненко, В.В. Ошорова // Автотранспортное предприятие. – 2016. – № 4. – С. 7-14. – EDN: VSWXGJ.

5. Артемова, И.В. Новые нормы расхода ГСМ / И.В. Артемова // Советник бухгалтера государственного и муниципального учреждения. – 2016. – № 1 (134). – С. 66-72. – EDN: VJNDWL.
6. Мадеев, В.Д. Электронные блоки управления двигателями современных автомобилей / В.Д. Мадеев, И.В. Лазута // Техника и технологии строительства. – 2016. – № 3 (7). – С. 16-22. – EDN: XILBPV.
7. Влияние аэродинамики на скоростные показатели автомобиля / Д.О. Ситников, А. Исабаев, Д.О. Чернышев, А.П. Пупышев // Техника и технология транспорта. – 2023. – № 1 (28). – EDN: RHXTGJ.
8. Определение сцепных характеристик шипованных шин с уводом / А.М. Иванов, С.Р. Кристальный, Н.В. Попов, В.А. Фомичёв // Журнал автомобильных инженеров. – 2017. – № 6 (107). – С. 14-21. – EDN: YUVUDH.
9. Кристальный, С.Р. Метод определения коэффициента сцепления при испытаниях антиблокировочных систем легковых автомобилей / С.Р. Кристальный, Н.В. Попов, В.А. Фомичев // Автотранспортное предприятие. – 2014. – № 6. – С. 50-53. – EDN: SFKETD.
10. Измерительный комплекс для определения эффективности действия электронных систем контроля устойчивости автомобилей / С.Р. Кристальный, М.А. Топорков, В.А. Фомичев, Н.В. Попов // Автотранспортное предприятие. – 2015. – № 6. – С. 37-41. – EDN: TVOSLV.
11. Иванов, А.М. Использование прогнозирования коэффициента сцепления шин с опорной поверхностью для повышения эффективности действия опережающих систем экстренного торможения / А.М. Иванов, С.Р. Кристальный, М.А. Топорков // Автомобильная промышленность. – 2018. – № 2. – С. 17-21. – EDN: ХМНТВZ.
12. Малиновский, М.П. Расчёт давления на дорожное покрытие при торможении грузового автотранспорта в соответствии с действующим законодательством / М.П. Малиновский, А.А. Фотиади // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2022. – № 4 (71). – С. 76-86. – EDN: SJHLVL.
13. Миронова, В.В. Динамические процессы автомобиля при наезде на ступенчатое препятствие / В.В. Миронова // Грузовик. – 2016. – № 11. – С. 20-26. – EDN: XIPFQR.
14. Кристальный, С.Р. Влияние жесткости кузова на управляемость колесных транспортных средств / С.Р. Кристальный, Н.В. Попов // Автотранспортное предприятие. – 2007. – № 9. – С. 46-49. – EDN: KWUYSP.
15. Додонов, Б.М. Управление курсовым движением автомобиля по направляющей точке / Б.М. Додонов, В.И. Кольцов, И.А. Долгов // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2009. – № 4. – С. 45-61. – EDN: KYTADX.

16. Малиновский, М.П. Учёт бортовыми средствами дифференциала подрессоренных масс транспортного средства при определении его загрузки / М.П. Малиновский // Автомобильная промышленность. – 2022. – № 10. – С. 18-23. – EDN: DBRYIW.
17. Суходоля, А.В. Электромеханический компенсатор крена высокоскоростного автомобиля / А.В. Суходоля, В.В. Гулый, Д.Д. Соколов // Транспортное дело России. – 2023. – № 3. – С. 164-166. – EDN: ВУРАWF.
18. Фролов, В.Г. Стенд для обкатки коробок передач легковых переднеприводных автомобилей / В.Г. Фролов, И.А. Сергеев // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2018. – № 3 (29). – С. 62-66. – EDN: YQFAHB.
19. Гаевский, В.В. Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Теория эксплуатационных свойств АТС» / В.В. Гаевский, А.М. Иванов. – М.: МАДИ, 2013. – 53 с.

References

1. Karmyshov D.D., Zenchenko V.A. *Problemy tehniceskoy jekspluatacii i avtoservisa podvizhnogo sostava avtomobil'nogo transporta*, 2021, pp. 152-158.
2. Bludilin A.I., Bludilina V.V., Dygalo V.G., Dygalo L.V. *Rezultaty sovremennyh nauchnyh issledovanij i razrabotok*, 2017, pp. 28-36.
3. Evdonin E.S., Dushkin P.V., Kuz'min A.I., Hovrenok S.S., Kremnev V.V. *Trudy NAMI*, 2021, no. 4, pp. 12-21.
4. Chebotaev A.A., Efimenko D.B., Ivahnenko A.M., Oshorova V.V. *Avtotransportnoe predpriyatie*, 2016, no. 4, pp. 7-14.
5. Artemova I.V. *Sovetnik buhgaltera gosudarstvennogo i municipal'nogo uchrezhdenija*, 2016, no. 1, pp. 66-72.
6. Madeev V.D., Lazuta I.V. *Tehnika i tehnologii stroitel'stva*, 2016, no. 3, pp. 16-22.
7. Sitnikov D.O., Isabaev A., Chernyshev D.O., Pupyshev A.P. *Tehnika i tehnologija transporta*, 2023, no. 1.
8. Ivanov A.M., Kristal'nyj S.R., Popov N.V., Fomichjov V.A. *Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov*, 2017, no. 6, pp. 14-21.
9. Kristal'nyj S.R., Popov N.V., Fomichev V.A. *Avtotransportnoe predpriyatie*, 2014, no 6, pp. 50-53.
10. Kristal'nyj S.R., Toporkov M.A., Fomichev V.A., Popov N.V. *Avtotransportnoe predpriyatie*, 2015, no. 6, pp. 37-41.
11. Ivanov A.M., Kristal'nyj S.R., Toporkov M.A. *Avtomobil'naja promyshlennost'*, 2018, no. 2, pp. 17-21.

12. Malinovskij M.P., Fotiadi A.A. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta (MADI)*, 2022, no. 4, pp. 76-86.
13. Mironova V.V. *Gruzovik*, 2016, no. 11, pp. 20-26.
14. Kristal'nyj S.R., Popov N.V. *Avtotransportnoe predpriyatie*, 2007, no. 9, pp. 46-49.
15. Dodonov B.M., Kol'cov V.I., Dolgov I.A. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Matematika. Mehanika. Komp'yuternye nauki*, 2009, no. 4, pp. 45-61.
16. Malinovskij M.P. *Avtomobil'naja promyshlennost'*, 2022, no. 10, pp. 18-23.
17. Suhodolja A.V., Gulyj V.V., Sokolov D.D. *Transportnoe delo Rossii*, 2023, no. 3, pp. 164-166.
18. Frolov V.G., Sergeev I.A. *Tehničeskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*, 2018, no. 3, pp. 62-66.
19. Gaevskij V.V., Ivanov A.M. *Metodicheskie ukazaniya k praktičeskim zanjatijam po discipline «Teorija jekspluatacionnyh svojstv ATS» [Methodical instructions for practical training in the discipline «Theory of operational properties of vehicles»]*. Moscow, MADI, 2013, 53 p.

Рецензент: В.В. Гаевский, д-р техн. наук, проф., МАДИ

Информация об авторах

Малиновский Михаил Павлович, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Фёдоров Андрей Анатольевич, ст. преподаватель, МАДИ.

Альбицкий Александр Николаевич, студент, МАДИ.

Information about the authors

Malinovsky Mikhail P., Ph.D., associate professor, MADI.

Fedorov Andrej A., senior lecturer, MADI.

Albitckiy Aleksandr N., student, MADI.

Статья поступила в редакцию 19.09.2023; одобрена после рецензирования 19.09.2023; принята к публикации 21.09.2023.

The article was submitted 19.09.2023; approved after reviewing 19.09.2023; accepted for publication 21.09.2023.