УДК 629.3.027.48

ПРОЕКТИРОВОЧНЫЙ РАСЧЁТ МАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМОБИЛЬНОГО КОЛЕСА

Михаил Павлович Малиновский, канд. техн. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, ntbmadi@gmail.com,
Сергей Вячеславович Борисов, канд. техн. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64,sv-brisov@mail.ru,
Артём Эдуардович Карьялайнен, студент,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, artem_karyalaynen@mail.ru

Аннотация. При проектировании автотранспортных средств, в том числе большегрузных транспортных средств специального назначения, проводится оценка таких эксплуатационных свойств, как тяговая динамика и тормозная эффективность. Моделирование процесса разгона и торможения сводится к дифференциальному уравнению движения, для решения которого необходимо знать момент инерции колеса относительно оси его вращения. Как известно, момент инерции твёрдого тела относительно данной оси равен сумме произведений масс всех его точек на квадраты расстояний до этой оси. Поэтому предварительно возникает необходимость в определении массы колеса. Однако экспериментальное определение инерционных характеристик колеса на стадии проектирования автомобиля не всегда реализуемо. В данной статье предлагается методика оценочного расчета момента инерции автомобильного колеса относительно оси его вращения. Колесо представлено как совокупность колесного диска, шины и камеры. С целью определения инерционных характеристик каждый из этих элементов разбит на тела более простой формы. Помимо этого учтены инерционные характеристики воздуха, находящегося в камере под номинальным давлением. Для оценки адекватности параметров, получаемых с использованием предлагаемой методики, были выполнены измерения толщин перечисленных компонентов.

Ключевые слова: транспортные средства специального назначения; масса; момент инерции; шина; колёсный диск.

DESIGN CALCULATION OF INERTIAL CHARACTERISTICS OF A VEHICLE WHEEL

Malinovsky Mikhail P., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, ntbmadi@gmail.com,
Borisov Sergei V., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia,sv-brisov@mail.ru,

Karyalaynen Artem E., student,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia,artem_karyalaynen@mail.ru,

Abstract. When designing motor vehicles, including heavy-duty special-purpose vehicles, performance characteristics such as traction dynamics and braking performance are evaluated. Modeling the process of acceleration and deceleration is reduced to the differential equation of motion, in order to solve which one should know the moment of inertia of the wheel relatively to its axis of rotation. It is known that the moment of inertia of a solid relative to a given axis is equal to the sum of the products of the masses of all its points by the squares of the distances to this axis. Therefore, previously there is a need to determine the mass of the wheel. However, the experimental determination of the mass characteristics of the wheels at the design stage is not always easy to realize. In this article a method of estimation calculation of the moment of inertia of an automobile wheel relatively to its axis of rotation is proposed. The wheel is represented as a summation of rim, tire and tire tube. In order to determine the inertial characteristics each of those elements is divided into bodies of a simpler form. In addition, the inertial characteristics of the air in the tire tube compressed to a nominal pressure were taken into account. In order to assess the adequacy of parameters calculated by the developed model, the thickness of the listed elements was experimentally established.

Keywords: special purpose vehicle; mass; inertia; tire; road wheel

Введение и постановка задачи

Значение тяговой и тормозной динамики при оценке эксплуатационных качеств автотранспортных средств (АТС), в том числе большегрузных транспортных средств специального назначения (ТССН), трудно переоценить. Поэтому двумя важнейшими этапами при их проектировании являются тягово-динамический расчёт и проверка тормозной эффективности [1]. Моделирование процесса разгона АТС сводится к решению дифференциального уравнения движения [2]:

$$m\delta_{вр}\frac{dv}{dt} = P_{ко} - \Sigma P_{с},$$

где $\delta_{вр} = 1 + \frac{J_д U^2 \eta + \sum J_к}{r_д^2 m}$ – коэффициент учёта вращающихся масс;

m – масса АТС;

$P_{ко}$ – полная окружная сила на ведущих колёсах (сила сцепления);

ΣP_c – сумма сил сопротивления движению [3];

$J_д$ – момент инерции вращающихся частей двигателя [4];

$\Sigma J_к$ – сумма моментов инерции всех колёс [5];

$r_д$ – динамический радиус колёс [6];

U – общее передаточное число трансмиссии;

η – КПД трансмиссии.

При моделировании процесса торможения используется уравнение движения колеса [7]:

$$J_к \varepsilon_к = M_т - M_\varphi,$$

где $J_к$ – момент инерции колеса;

$M_т$ – момент, создаваемый тормозным механизмом [8];

M_φ – момент, возможный по сцеплению колеса с дорогой [9].

Очевидно, что одной из характеристик, влияющих на решение приведённых выше уравнений, является **момент инерции колеса**. Данный параметр также имеет важное значение при проектировании и расчёте систем рекуперации торможения для АТС с комбинированными энергетическими установками [10] и электромобилей [11].

Момент инерции «может быть определен экспериментально при помощи специальных стендов, либо – по чертежам соответствующих деталей рассматриваемой системы, что весьма трудоемко» [12]. Однако экспериментальное определение момента инерции не всегда доступно. Поэтому при проектировочных расчётах приходится использовать расчётные методы. В данной статье предлагается методика, которая позволяет оценить инерционные характеристики автомобильного колеса без выполнения экспериментальных исследований.

Составление расчётной модели

Момент инерции тела относительно произвольной оси ℓ определяется следующим выражением [13]:

$$J = \int_{M} h_{\ell}^{2} dm,$$

где h_{ℓ} – расстояние от элемента массой dm до оси ℓ.

Для однородного тела формула вычисления момента инерции может быть записана в следующем виде:

$$J = \rho \int_{V} h_{\ell}^{2} dv,$$

где ρ – плотность тела.

Задачу вычисления момента инерции колеса можно решить, представив его как совокупность нескольких тел. Для этого колесо, состоящее из колесного диска, шины и камеры, прежде всего следует представить как совокупность этих элементов, а затем каждый из них можно разбить на тела более простой формы. На рис. 1 представлено поперечное сечение модели колеса, построенной по этому принципу. При составлении модели было принято допущение об однородности материала шины, камеры и колесного диска. Таким образом, в предлагаемой модели считается, что плотность шины, плотность камеры и плотность диска являются константами.

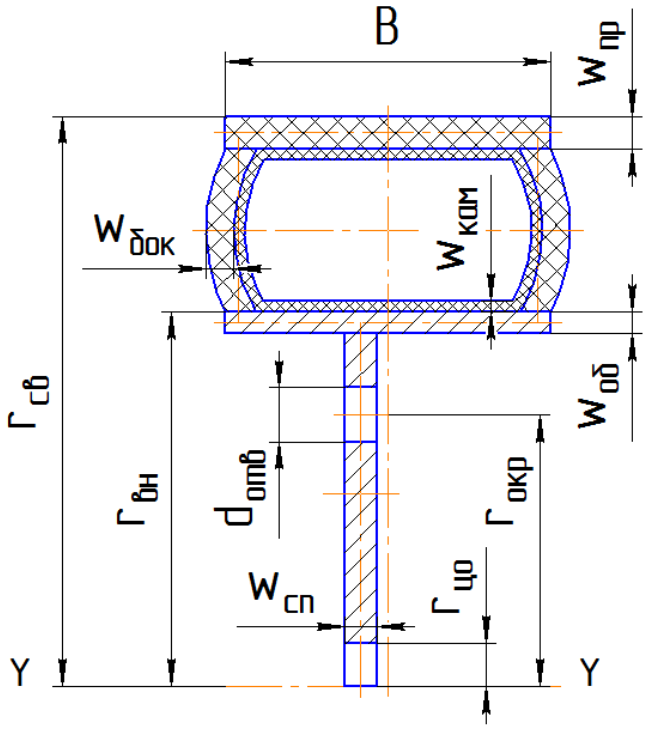

Рис.1. Поперечное сечение модели колеса:

B – ширина профиля шины; $w_{пр}$, $w_{бок}$, $w_{кам}$, $w_{об}$, $w_{сп}$ – толщина протектора, боковины, камеры, обода и колёсного диска соответственно; $r_{св}$ – свободный радиус; $r_{вн}$ – посадочный радиус; $d_{отв}$ – диаметр вентиляционного отверстия; $r_{окр}$ – радиус окружности, на которой расположены вентиляционные отверстия; $r_{цо}$ – радиус центрального отверстия; Y-Y – ось вращения колеса

С учетом предложенного выше, а также принимая во внимание воздух, находящийся в камере, формулы вычисления массы и момента инерции колеса относительно оси его вращения можно записать в следующем виде:

$$m = m_{ш} + m_{кам} + m_{кд} + m_{в};$$

$$J_{Y} = J_{ш} + J_{кам} + J_{кд} + J_{в},$$

где $m_{ш}$, $m_{кам}$, $m_{кд}$, $m_{в}$ – масса шины, камеры, колесного диска и воздуха в шине соответственно;

$J_{ш}$, $J_{кам}$, $J_{кд}$, $J_{в}$ – момент инерции относительно оси вращения колеса соответственно шины, камеры, колесного диска и воздуха в шине.

Вычислим объём каждого элемента колеса по модели, представленной на рис. 1. Объём шины:

$$V_{ш} = V_{пр} + 2 \cdot V_{бок},$$

где $V_{пр}$ – объём протектора шины;

$V_{бок}$ – объём одной боковины шины.

Объём протектора шины:

$$V_{пр} = \pi \cdot \left(r_{св}^2 - \left(r_{св} - w_{пр}\right)^2\right) \cdot B.$$

Учитывая малость $w_{пр}$ по сравнению с $r_{св}$, объём протектора можно вычислить по приближенной формуле:

$$V_{пр} = 2\pi r_{св} w_{пр} B.$$

Боковина шины имеет криволинейную поверхность. Рассмотрим поперечное сечение боковины. В первом приближении можно принять, что оно имеет форму окружности (рис. 2, а), где *e* – половина разности ширины профиля шины и посадочной ширины обода. Однако если последняя неизвестна, можно считать, что центр окружности лежит в плоскости симметрии профиля шины. При таком допущении боковина имеет поверхность усеченного тора:

$$h = r_{св} - w_{пр} - r_{вн};$$

$$r = 0{,}5\sqrt{B^2 + h^2};$$

$$e = r - 0{,}5 \cdot B.$$

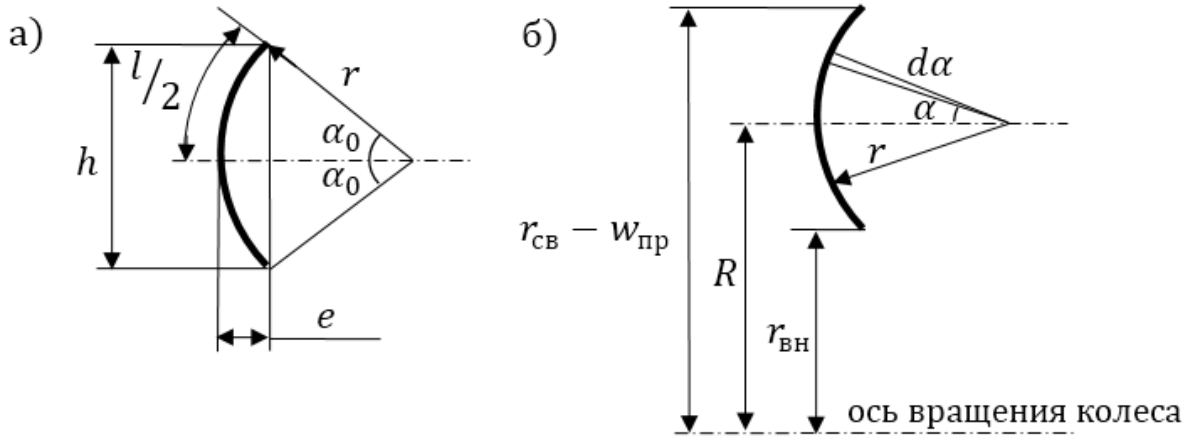

Рис.2. Расчётная схема боковины шины

Зная величины h, r и e, найдем угол α_0 и длину дуги l:

$$\alpha_0 = \arcsin\frac{h}{2r};$$

$$l = 2r\alpha_0.$$

Найдем площадь поверхности боковины $S_{бок}$ как площадь поверхности усеченного тора. Это можно сделать непосредственным интегрированием или воспользовавшись первой теоремой Паппа-Гульдина:

$$dS_{бок} = 2\pi(R + r\cdot\sin\alpha)r\cdot d\alpha;$$

$$S_{бок} = 2\pi\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0}(Rr + r^2\sin\alpha)d\alpha = 4\pi Rr\alpha_0,$$

где $R=r_{вн}+0{,}5h$ – расстояние от оси вращения колеса до оси симметрии поперечного сечения боковины (рис. 2, б);

угол α_0 выражен в радианах.

Тогда объём одной боковины шины:

$$V_{бок} = S_{бок}\cdot w_{бок}.$$

Объём камеры без учета полости, заполненной воздухом:

$$V_{кам} = V_{к1} + V_{к2} + 2V_{к3},$$

где $V_{к1}$ – объём части камеры, прилегающей к протектору шины;

$V_{к2}$ – объём части камеры, прилегающей к ободу колёсного диска;

$V_{к3}$ – объём одной боковой части камеры.

Учитывая малость толщины камеры, получим:

$$V_{к1} = 2\pi(r_{св} - w_{пр})B\cdot w_{кам};$$

$$V_{к2} = 2\pi r_{вн}B\cdot w_{кам};$$

$$V_{к3} = S_{бок}\cdot w_{кам}.$$

Чтобы рассчитать внутренний объём воздуха $V_{св}$ при свободном состоянии колеса, применим вторую теорему Паппа-Гульдина:

$$S_{св} = \left(r_{св} - w_{пр} - r_{вн} - 2w_{кам}\right)B + r_1^2\left(\alpha_0 - 0{,}5 \cdot \sin 2\alpha_0\right);$$

$$V_{св} = 2\pi R S_{св},$$

где $r_1 = r - w_{кам}$.

Объём обода колёсного диска:

$$V_{об} = \pi \cdot \left(r_{вн}^2 - \left(r_{вн} - w_{об}\right)^2\right) \cdot B.$$

Объём колёсного диска как сплошного тела без вентиляционных отверстий и обода:

$$V_{сп} = \pi \cdot \left(\left(r_{вн} - w_{об}\right)^2 - r_{цо}^2\right) \cdot w_{сп}.$$

Объём, соответствующий одному вентиляционному отверстию в колёсном диске:

$$V_{отв} = \frac{\pi d_{отв}^2}{4} \cdot w_{сп}.$$

Чтобы с учётом принятых допущений определить массу каждого элемента шины по справочным данным [14], необходимо выяснить, какую долю объема занимает каждый из них в общем объеме шины, включая камеру. Тогда массы протектора, боковины и камеры можно вычислить по следующим формулам:

$$m_{пр}^* = m_{шк(э)} \frac{V_{пр}}{V_{пр} + 2V_{бок} + V_{кам}};$$

$$m_{бок}^* = m_{шк(э)} \frac{V_{бок}}{V_{пр} + 2V_{бок} + V_{кам}};$$

$$m_{кам}^* = m_{шк(э)} \frac{V_{кам}}{V_{пр} + 2V_{бок} + V_{кам}}.$$

Аналогично можно определить массу элементов колёсного диска. Однако если массы шины и диска неизвестны, необходимо обратиться к справочным значениям плотности:

$\rho_{рез}$=1190 кг/м^3 – для вулканизированного каучука;

$\rho_{кд}$=7800 кг/м^3 – для стали, применяемой в изготовлении штампованных дисков.

Ниже приведены формулы для вычисления масс шины, камеры и колёсного диска:

$$m_{ш} = \rho_{рез}\left(V_{пр} + 2 \cdot V_{бок}\right);$$

$$m_{кам} = \rho_{рез} V_{кам};$$

$$m_{кд} = \rho_{кд}\left(V_{об} + V_{сп} - N_{отв} V_{отв}\right),$$

где $N_{отв}$ – число вентиляционных отверстий [15].

Теперь вычислим моменты инерции элементов колеса с учётом допущений, принятых в модели.

Момент инерции шины:

$$J_{ш} = J_{пр} + 2 \cdot J_{бок};$$

$$J_{пр} = \frac{m_{пр}}{2}\left(r_{св}^2 + \left(r_{св} - w_{пр}\right)^2\right),$$

где $J_{пр}$ – момент инерции протектора шины;

$J_{бок}$ – момент инерции одной боковины шины.

Учитывая небольшую толщину протектора, его момент инерции можно также рассчитать по приближенной формуле

$$J_{пр} = m_{пр}\left(r_{св} - \frac{w_{пр}}{2}\right)^2.$$

Вычислим момент инерции одной боковины шины как момент инерции усеченного тора. Рассмотрим кольцевой элемент массой dm,

соответствующий центральному углу $d\alpha$, все точки которого расположены на расстоянии $R+r\cdot sin\alpha$ от оси вращения колеса (см. рис. 2, б). Найдем массу этого элемента:

$$dm = \rho_{рез} w_{бок} dS_{бок} = 2\pi\rho_{рез} w_{бок} (R + r\cdot\sin\alpha) r\cdot d\alpha .$$

Тогда с учётом малости толщины боковины шины момент инерции одной боковины можно вычислить по следующей формуле:

$$J_{бок} = \int_{M} (R + r\cdot\sin\alpha)^2 dm = 2\pi\rho_{рез} w_{бок} r \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} (R + r\cdot\sin\alpha)^3 \cdot d\alpha .$$

После интегрирования получим:

$$J_{бок} = 2\pi\rho_{рез} w_{бок} r\left[2R^3\alpha_0 + 3Rr^2(\alpha_0 - 0{,}5\cdot\sin 2\alpha_0)\right].$$

Аналогично вычислим момент инерции камеры:

$$J_{кам} = J_{к1} + J_{к2} + 2J_{к3},$$

где $J_{к1}$ – момент инерции части камеры, прилегающей к протектору шины;

$J_{к2}$ – момент инерции части камеры, прилегающей к ободу колёсного диска;

$J_{к3}$ – момент инерции одной боковой части камеры.

Учитывая небольшую толщины камеры, моменты инерции её элементов можно вычислить по следующим формулам:

$$J_{к1} = \frac{\rho_{рез} V_{к1}}{2}\left((r_{св} - w_{пр})^2 + (r_{св} - w_{пр} - w_{кам})^2\right);$$

$$J_{к2} = \frac{\rho_{рез} V_{к2}}{2}\left(r_{вн}^2 + (r_{вн} + w_{кам})^2\right);$$

$$J_{к3} = 2\pi\rho_{рез} w_{кам} r\left[2R^3\alpha_0 + 3Rr^2(\alpha_0 - 0{,}5\cdot\sin 2\alpha_0)\right].$$

Или приближенно:

$$J_{к1} = \rho_{рез} V_{к1} \left(r_{св} - w_{пр} - \frac{w_{кам}}{2} \right)^2;$$

$$J_{к2} = \rho_{рез} V_{к2} \left(r_{вн} + \frac{w_{кам}}{2} \right)^2.$$

Момент инерции колёсного диска:

$$J_{кд} = J_{об} + J_{сп};$$

$$J_{об} = \frac{m_{об}}{2} \cdot \left(r_{вн}^2 + \left(r_{вн} - w_{об} \right)^2 \right)$$

или приближенно:

$$J_{об} = m_{об} \cdot \left(r_{вн} - \frac{w_{об}}{2} \right)^2;$$

$$J_{сп} = \frac{m_{сп}}{2} \cdot \left(\left(r_{вн} - w_{об} \right)^2 + r_{цо}^2 \right) - \rho_{кд} N_{отв} V_{отв} r_{окр}^2,$$

где $J_{об}$ – момент инерции обода колесного диска;

$J_{сп}$ – момент инерции колёсного диска за вычетом обода и вентиляционных отверстий.

При определении момента инерции колеса обычно не учитывают массу воздуха внутри шины при номинальном манометрическом давлении p_{nom} [14]. За счёт сил трения, возникающих на поверхности соприкосновения воздуха и камеры, воздух, находящийся внутри камеры, приводится в движение и начинает вращаться вместе с колесом, что оказывает влияние на момент инерции колеса. Оценим влияние воздуха в шине на момент инерции колеса. Вычислим плотность воздуха при нормальных условиях:

$$\rho_{в0} = \frac{M_в p_а}{R T_0} = \frac{28{,}8 \cdot 101325}{8314 \cdot 273{,}15} = 1{,}285 \text{ кг/м}^3,$$

где $M_в$=0,79·28+0,21·32=28,8 кг/кмоль – молярная масса воздуха;

p_a=101325 Па – нормальное атмосферное давление;

R=8314 Дж/(К·кмоль) – газовая постоянная;

T_0=273,15 К – температура при нормальных условиях.

Плотность воздуха при номинальном давлении в шине:

$$\rho_в = \rho_{в0} \cdot \frac{p_{nom} + p_a}{p_a} \cdot \frac{T_0}{T},$$

где T – температура воздуха в шине.

В данном случае нас интересует зависимость плотности воздуха от давления, поэтому температурные изменения не учитываются (T_0/T=1). Тогда получим следующее выражения для массы воздуха в шине:

$$m_в = \rho_{в0} \cdot \frac{p_{nom} + p_a}{p_a} \cdot V_{св}.$$

Зная массу воздуха в шине, его момент инерции можно вычислить по приближенной формуле:

$$J_в = \frac{m_в}{2}\left(\left(r_{св} - w_{пр} - w_{кам}\right)^2 + \left(r_{вн} + w_{кам}\right)^2\right).$$

Тогда суммарный момент инерции колеса относительно оси вращения Y можно определить по формуле:

$$J_Y = J_ш + J_{кам} + J_{кд} + J_в.$$

Результаты расчёта

Согласно проведённым в ходе исследования опытным замерам толщину элементов шины и диска можно принять по табл. 1. Результаты расчёта массы приведены в табл. 2–4, момента инерции – в табл. 5–7.

Таблица 1

Толщина элементов шин и колёсных дисков

Типоразмер	$w_{пр}$, мм	$w_{бок}$, мм	$w_{об}$, мм	$w_{сп}$, мм	$d_{цо}$, мм
R=13″	12	6	4	4	60
R=20″	32…42	14	10	12	281
R=21…27″	48…60	14…28	10…12	16	420

Таблица 2

Масса элементов колёс для легковых АТС (ГОСТ 4754-97)

Типоразмер	Рис.	$m_{шк}$, кг	$m_{шк(э)}$, кг	$\Delta m_{шк}$, %	$m_{кд}$, кг	$\Delta m_{кд}$, %	$m_{в}$, кг
155-13 (6,15-13)	Д	8,431	7,7	-9,50	7,080	2,47	0,109
	У	8,431	7,7	-9,50	7,080	2,47	0,109
	З	8,677	8,1	-7,13	7,080	2,47	0,109
165-13 (6,45-13)	Д	8,974	9	0,29	7,368	-1,49	0,113
	У	9,235	9	-2,61	7,368	-1,49	0,113
	З	9,235	9,5	2,79	7,368	-1,49	0,113
175-13 (6,95-13)	Д	9,575	9,8	2,29	7,720	-6,34	0,119
	З	9,414	10,2	7,71	7,720	-6,34	0,119
175/70R13	Д	8,421	8,3	-1,45	8,083	-11,34	0,110
155/80R13	Д	7,816	7,7	-1,51	7,475	-2,97	0,095
165/80R13	Д	8,838	7,9	-11,87	7,795	-7,37	0,115
155/82R13	Д	8,345	8,3	-0,55	7,507	-3,41	0,101

Условные обозначения: $m_{шк}$, $m_{кд}$, $m_{в}$ – расчётная масса шины с камерой, колёсного диска и воздуха соответственно; $m_{шк(э)}$, $m_{кд(э)}$ –

справочные значения массы; $\Delta m_{шк}$ – погрешность расчёта массы шины с камерой; $\Delta m_{кд}$ – погрешность расчёта массы колёсного диска.

Примечание 1: в колонке «Рис.» указан рисунок протектора: У – универсальный; Д – дорожный; З – зимний; П – повышенной проходимости; К – карьерный.

Примечание 2: средняя справочная масса стального колёсного диска R13 $m_{кд(э)}$=7,26 кг.

Таблица 3

Масса элементов колёс для грузовых АТС (ГОСТ 5513-97)

Типоразмер	Рис.	$m_{шк}$, кг	$m_{шк(э)}$, кг	$\Delta m_{шк}$, %	$m_{кд}$, кг	$m_{кд(э)}$, кг	$\Delta m_{кд}$, %	$m_{в}$, кг
7,50R20 (220R508)	У	41,100	36,5	-12,60	38,183	37	-3,20	0,806
7,50-20 (220-508)	У	41,454	38,5	-7,67	38,183	37	-3,20	0,702
8,25R20 (240R508)	У	47,155	46,5	-1,41	40,380	37	-9,13	1,056
	П	47,344	47,5	0,33	40,380	37	-9,13	1,063
8,25-20 (240-508)	У	47,723	50	4,55	40,380	37	-9,13	0,887
9,00R20 (260R508)	У	59,043	56	-5,43	43,674	43,9	0,51	1,374
9,00-20 (260-508)	У	59,620	57	-4,60	43,430	43,9	1,07	1,309
	Д	59,090	57	-3,67	43,430	43,9	1,07	1,287
10,00R20 (280R508)	Д	66,698	70	4,72	46,115	43,9	-5,05	1,891
10,00-20 (280-508)	Д	67,414	66	-2,14	45,261	43,9	-3,10	1,360

11,00R20 (300R508)	У	76,781	80	4,02	47,946	45	-6,55	2,031
	Д	75,970	76	0,04	47,335	45	-5,19	2,120
11,00-20 (300-508)	Д	75,360	70	-7,66	47,335	45	-5,19	1,461
	Д	75,360	75	-0,48	47,335	45	-5,19	1,693
	Д	75,360	80	5,80	47,335	45	-5,19	1,972
12,00R20 (320R508)	У	86,553	88	1,64	49,898	48	-3,95	2,224
	Д	86,553	84,5	-2,43	49,898	48	-3,95	2,641
12,00-20 (320-508)	У	89,542	88	-1,75	50,142	48	-4,46	1,924
	Д	87,561	88	0,50	50,142	48	-4,46	2,184

Таблица 4

Масса элементов колёс для грузовых АТС (ГОСТ 8430-85, ГОСТ 13298-90)

Типоразмер	Рис.	$m_{шк}$, кг	$m_{шк(э)}$, кг	$\Delta m_{шк}$, %	$m_{кд}$, кг	$m_{кд(э)}$, кг	$\Delta m_{кд}$, %	$m_{в}$, кг
16,00-24	П	173,59	167	-3,94	115,95	122	4,96	2,744
18,00-24 (1600x500-610)	П	289,41	292	0,89	131,31	120	-9,43	5,319
20,5-25	П	248,20	256	3,05	144,55	141	-2,52	3,236
21,00-28	П	375,29	382	1,76	183,29	120	-52,74	6,604
1220x400-533	П	130,04	112	-16,11	60,02	58,8	-2,07	1,847
1300x530-533	П	192,34	160	-20,22	73,74	68,6	-7,50	3,027
1500x600-635	П	252,49	225	-12,22	131,05	120	-9,21	4,653
1600x600-685	П	313,30	310	-1,07	144,52	120	-20,43	5,817

Таблица 5

Расчётные моменты инерции колёс типоразмеров R13

Типоразмер	Рис.	$J_ш$, кг·м^2	$J_{кам}$, кг·м^2	$J_{кд}$, кг·м^2	$J_в$, кг·м^2	J_Y, кг·м^2
155-13 (6,15-13)	Д	0,509	0,093	0,161	0,006	0,769
	У	0,509	0,093	0,161	0,006	0,769
	З	0,509	0,108	0,161	0,006	0,783
165-13 (6,45-13)	Д	0,561	0,102	0,168	0,006	0,838
	У	0,561	0,118	0,168	0,006	0,853
	З	0,561	0,118	0,168	0,006	0,853
175-13 (6,95-13)	Д	0,586	0,122	0,178	0,007	0,893
	З	0,586	0,112	0,178	0,007	0,883
175/70R13	Д	0,486	0,088	0,176	0,006	0,755
155/80R13	Д	0,443	0,081	0,160	0,005	0,689
165/80R13	Д	0,516	0,108	0,168	0,006	0,799
155/82R13	Д	0,473	0,100	0,161	0,005	0,739

Условные обозначения: $J_ш$, $J_{кам}$, $J_{кд}$, $J_в$ – момент инерции шины, камеры, колёсного диска и воздуха внутри камеры соответственно; J_Y – момент инерции колеса относительно оси вращения

Таблица 6

Расчётные моменты инерции колёс типоразмеров R20

Типоразмер	Рис.	$J_ш$, кг·м^2	$J_{кам}$, кг·м^2	$J_{кд}$, кг·м^2	$J_в$, кг·м^2	J_Y, кг·м^2
7,50R20 (220R508)	У	6,414	0,535	2,106	0,101	9,156
7,50-20 (220-508)	У	6,517	0,544	2,106	0,089	9,255

8,25R20 (240R508)	У	7,971	0,693	2,242	0,142	11,048
	П	8,031	0,699	2,242	0,143	11,115
8,25-20 (240-508)	У	8,152	0,710	2,242	0,120	11,224
9,00R20 (260R508)	У	11,047	0,966	2,446	0,198	14,657
9,00-20 (260-508)	У	11,296	0,991	2,431	0,191	14,909
	Д	11,102	0,973	2,431	0,186	14,692
10,00R20 (280R508)	Д	12,706	1,463	2,597	0,284	17,050
10,00-20 (280-508)	Д	13,121	1,524	2,545	0,209	17,398
11,00R20 (300R508)	У	15,823	1,652	2,711	0,318	20,504
	Д	15,620	1,638	2,673	0,332	20,263
11,00-20 (300-508)	Д	15,368	1,610	2,673	0,227	19,878
	Д	15,368	1,610	2,673	0,263	19,914
	Д	15,368	1,610	2,673	0,306	19,957
12,00R20 (320R508)	У	19,279	1,920	2,832	0,368	24,399
	Д	19,279	1,920	2,832	0,437	24,468
12,00-20 (320-508)	У	20,602	2,058	2,847	0,329	25,836
	Д	19,676	1,958	2,847	0,365	24,846

Таблица 7

Расчётные моменты инерции колёс типоразмеров R21…R28

Типоразмер	Рис.	$J_ш$, кг·м^2	$J_{кам}$, кг·м^2	$J_{кд}$, кг·м^2	$J_в$, кг·м^2	J_Y, кг·м^2
16,00-24	П	71,788	5,350	9,839	0,794	87,771

18,00-24 (1600x500-610)	П	133,231	7,730	11,192	1,697	153,851
20,5-25	П	100,441	5,781	13,327	0,939	120,489
21,00-28	П	219,488	11,487	20,998	2,712	254,685
1220x400-533	П	33,577	3,730	4,024	0,345	41,676
1300x530-533	П	58,112	3,636	4,964	0,628	67,340
1500x600-635	П	105,916	6,605	12,170	1,377	126,067
1600x600-685	П	149,258	7,658	15,462	1,908	174,286

Выводы

В таблице 8 приведены значения средней погрешности $(\Delta m_{шк})_{ср}$, $(\Delta m_{кд})_{ср}$ и среднего абсолютного отклонения $|\Delta m_{шк}|_{ср}$, $|\Delta m_{кд}|_{ср}$ расчёта соответственно массы шины с камерой и массы колёсного диска относительно справочных данных, в табл. 9 – среднее процентное соотношение элементов колеса относительно его суммарной массы и суммарного момента инерции.

Таблица 8

Погрешность расчёта относительно справочных данных

Типоразмеры	R13	R20	R21…28
$(\Delta m_{шк})_{ср}$, %	–2,59	–1,49	–5,98
$\|\Delta m_{шк}\|_{ср}$, %	4,61	3,64	7,65
$(\Delta m_{кд})_{ср}$, %	–2,9	–4,39	–12,37
$\|\Delta m_{кд}\|_{ср}$, %	3,39	2,15	12,11

Таблица 9

Процентное соотношение элементов колеса по массе и моменту инерции

Типоразмеры	R13	R20	R21…28
$m_{шк}$, %	53,65	58,13	66,03
$m_{кд}$, %	45,68	40,51	32,88
$m_{в}$, %	0,68	1,36	1,09
$J_{ш}$, %	67,07	76,43	85,19
$J_{кам}$, %	11,67	6,32	4,42
$J_{кд}$, %	20,52	15,98	9,50
$J_{в}$, %	0,74	1,28	0,89

Заключение

Авторами представлена расчётная методика, которая позволяет оценить инерционные характеристики автомобильного колеса при ограниченном количестве исходных данных и невозможности провести экспериментальные исследования. При соответствующем уточнении профиля поперечного сечения шины и колёсного диска можно добиться более точных результатов, особенно с применением систем автоматизированного проектирования и объёмного моделирования. Данная методика может применяться также при решении такой практической задачи, как выбор подходящих колёсных дисков в зависимости от запросов потребителя.

Список литературы

1. Павлов, В.В. Проектировочные расчёты транспортных средств специального назначения (ТССН): учебное пособие / В.В. Павлов. – Москва: МАДИ, 2014. – 116 с. – Библиогр.: с. 114.

2. Гладов, Г.И. Специальные транспортные средства: Теория: учебник для вузов / Г.И. Гладов, А.М. Петренко; под. ред. Г.И. Гладова. – Москва: Академкнига, 2006. – 215 с. – Библиогр.: с. 212. – ISBN 5-94628-254-9.

3. Малиновский, М.П. Системы управления колёсных машин: учебное пособие / М.П. Малиновский. – Москва: МАДИ, 2018. – 100 с. – Библиогр.: с. 96-97. – ISBN 978-5-7962-0234-0.

4. Сафронов, П.В. Моделирование параметрического возмущения колебаний силового агрегата на подвеске / П.В. Сафронов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2018. – Вып. 2. – С. 38-45. – Библиогр.: с. 44-45.

5. Гаевский, В.В. Развитие теории движения одноколейных транспортных средств: Монография / В.В. Гаевский. – Москва: МАДИ, 2019. – 176 с. – Библиогр.: с. 161-167. – ISBN 978-5-7962-0257-9.

6. Балакина, Е.В. К вопросу об определении коэффициента продольного скольжения колеса / Е.В. Балакина, Д.С. Сарбаев // Автомобильная промышленность. – 2018. – № 10. – С. 25-27. – Библиогр.: с. 27.

7. Железнов, Е.И. Автомобили. Теория эксплуатационных свойств: Конспект лекций: учебное пособие / Железнов Е.И., Ревин А.А. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2015. – 170 с. – Библиогр.: с. 169.

8. Дыгало, В.Г. Оценка адекватности при моделировании тормозной динамики автомобиля с АБС / В.Г. Дыгало, В.В. Котов, А.А. Ревин // Автомобильная промышленность. – 2012. – № 12. – С. 16–18. – Библиогр.: с. 18.

9. Малиновский, М.П. Итерационный метод расчета антиблокировочного цикла / М.П. Малиновский // Автомобильная промышленность. – 2011. – №5. – С. 33-35. – Библиогр.: с. 35.

10. Строганов, В.И. Математическое моделирование основных компонентов силовых установок электромобилей и автомобилей с КЭУ: Учебное пособие / Строганов В.И., Сидоров К.М. – Москва: МАДИ, 2015. – 100 с. – Библиогр.: с. 99.

11. Голубчик, Т.В. Определение характеристик зарядных станций для электротранспорта / Голубчик Т.В. // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 86. – Библиогр. в конце ст.

12. Павлов, В.В. Тягово-динамический расчёт транспортных средств специального назначения: методические рекомендации по подготовке курсовой работы / В.В. Павлов. – Москва: МАДИ, 2017. – 52 с. – Библиогр.: с. 47.

13. Розенблат, Г.М. К динамике неголономных моделей колесных экипажей / Розенблат Г.М. // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2008. – № 3. – С. 99-108. – Библиогр.: с. 108.

14. Краткий автомобильный справочник / А.Н. Понизовкин и др. – Москва: Трансконсталтинг; НИИАТ, 1994. – 779 с.

15. Балабин, И.В. К вопросу о влиянии вентиляционных отверстий на напряжённое состояние диска колеса грузового автомобиля / И.В. Балабин, А.С.

Груздев, И.С. Чабунин // Журнал автомобильных инженеров. – 2013. – № 6. – С. 20-23. – Библиогр.: с. 23.

References

1. Pavlov, V.V. *Proektirovochnye raschety transportnyh sredstv special'nogo naznachenija (TSSN)* [*Design calculations of special purpose vehicles*]. Moscow, MADI, 2014, 116 p.

2. Gladov G.I., Petrenko A.M. *Special'nye transportnye sredstva: Teorija* [*Special vehicles: Theory*]. Moscow, Akademkniga, 2006, 215 p.

3. Malinovskij, M.P. *Sistemy upravlenija koljosnyh mashin* [*Control systems of wheel vehicles*]. Moscow, MADI, 2018, 100 p.

4. Safronov P.V. *Vestnik MADI*, 2018, issue 2, pp. 38-45.

5. Gaevskij, V.V. *Razvitie teorii dvizhenija odnokolejnyh transportnyh sredstv* [*Development of the theory of single-track vehicles*]. Moscow, MADI, 2019, 176 p.

6. Balakina E.V., Sarbaev D.S. *Avtomobil'naja promyshlennost'*, 2018, no. 10, pp. 25-27.

7. Zheleznov E.I., Revin A.A. *Avtomobili. Teorija jekspluatacionnyh svojstv: Konspekt lekcij* [*Performance Theory: Lecture Summary*]. Volgograd, VolgGTU, 2015, 170 p.

8. Dygalo V.G., Kotov V.V., Revin A.A. *Avtomobil'naja promyshlennost'*, 2012, no. 12, pp. 16–18.

9. Malinovskij M.P. *Avtomobil'naja promyshlennost'*, 2011, No. 5, pp. 33-35.

10. Stroganov V.I., Sidorov K.M. *Matematicheskoe modelirovanie osnovnyh komponentov silovyh ustanovok jelektromobilej i avtomobilej s KJeU* [*Mathematical modeling of the main components of power plants of electric vehicles and cars with combined power plants*]. Moscow, MADI, 2015, 100 p.

11. Golubchik T.V. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*, 2014, no. 6, p. 86.

12. Pavlov V.V. *Tjagovo-dinamicheskij raschjot transportnyh sredstv special'nogo naznachenija* [*Traction and dynamic calculation of special vehicles*]. Moscow, MADI, 2017, 52 p.

13. Rozenblat G.M. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Matematika. Mehanika. Komp'juternye nauki*, 2008, no. 3, pp. 99-108.

14. Ponizovkin A.N. et al. Kratkij avtomobil'nyj spravochnik [*Quick automobile reference*]. Moscow, Transkonstalting, NIIAT, 1994, 779 p.

15. Balabin I.V., Gruzdev A.S., Chabunin I.S. *Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov*, 2013, no. 6, p. 20-23.

Рецензент: Н.И. Баурова, д-р. техн. наук, проф., МАДИ