av1019.fm Page 21 Thursday, September 26, 2019 10:36 AM

УДК 629.113

КАЧЕНИЕ КОЛЕСА

Д-ра техн. наук **МАМИТИ Г.И., ЛЬЯНОВ М.С., КИМ В.А.;**
кандидаты техн. наук **АГУЗАРОВ Т.Т., ГАГКУЕВ А.Е.;**
СЛАНОВ С.А.
Горский ГАУ (8672.53-28-84),
Белорусско-Российский университет

Теория качения ведущего колеса и схема его нагружения, на которых построена теория движения автомобиля, не учитывают влияние сил, приложенных к корпусу автомобиля — силы сопротивления воздуха и силы инерции. Пренебрежение ими приводит к неподтверждаемым на практике результатам. Обоснована схема нагружения ведущего колеса, через которое передаются все действующие на автомобиль силы к точке контакта колеса с опорной поверхностью.

Ключевые слова: *качение колеса; схема нагружения ведущего колеса; сила сопротивления воздуха; приведённая сила инерции; момент сопротивления качению.*

Mamity G.I., Lyanov M.S., Kim V.A., Aguzarov T.T., Gagkuev A.E., Slanov S.A.

THE ROLLING WHEEL

The theory of rolling of the driving wheel and its loading scheme, on which the theory of motion of the car is built, do not take into account the influence of forces applied to the body of the car — the force of air resistance and the force of inertia. Ignoring them leads to a non-confirmed in practice results. The scheme of loading of the driving wheel through which all forces acting on the car are transmitted to the point of contact of the wheel with the support surface is justified.

Keywords: *rolling wheel; loading the drive wheel; air resistance; reduced force of inertia; the moment of rolling resistance.*

Теория движения колёсных машин — автомобиля, трактора, мотоцикла и других — начинается с изучения сил и моментов, приложенных к неподвижному и катящемуся колёсам, на основе теорем механики [1—25 и др.].

Как известно, наука о движении и силах механика имеет три раздела: кинематика, статика и динамика. Последняя рассматривает взаимную связь между силами и производимыми ими движениями. Создание основ динамики принадлежит великим учёным — итальянцу Галилео Галилею (1564—1642) и англичанину Исааку Ньютону (1643—1727). В работах французских учёных Вариньона (Varignon) Пьера (1654—1722) и Пуансо (Poinsot) Луи (1777—1859) наряду с динамикой дальнейшее развитие получила и статика. Вариньон решил задачи сложения сил, приложенных к одной точке, и параллельных сил; он установил условия равновесия этих сил и доказал теорему о моменте равнодействующей плоской системы сил: *момент равнодействующей силы относительно любой точки на плоскости равен алгебраической сумме моментов составляющих сил относительно той же точки.*

Напомним основные определения понятий механики. *Силой* называется физическая величина, характеризующая взаимодействие по меньшей мере двух тел, имеющая точку приложения, направление и свою величину. *Моментом силы* называется произведение этой силы на длину перпендикуляра (плечо), опущенного из центра моментов на линию действия этой силы. При относительном перемещении двух прижатых друг к другу тел в плоскости касаний возникает *сила трения*. Различают трение *скольжения* и трение *качения,* последняя из которых обычно значительно меньше первой. Это наблюдение, на наш взгляд, привело к созданию колеса — самого замечательного и древнего изобретения человечества, которое облегчило его труд по перемещению различных предметов при помощи прообразов колёс — катков.

Одним из первых исследователей *движения автомобиля* был русский учёный Н.Е. Жуковский (1847—1921), изучавший в 1905 г. качение жёстко связанных между собой колёс, а в 1917 г. изложивший основы теории автомобиля. В 1918 г. Е.А. Чудаков (1890—1953) прочитал первые лекции по автомобилям в МВТУ. Позднее он создал учебники по теории, конструкции и расчёту автомобиля, положив тем самым начало широкому изучению автомобиля в учебных заведениях Советского Союза. В дальнейшем отдельные разделы теории и расчёта автомобиля получили развитие в трудах многих отечественных и зарубежных учёных.

Силы, действующие на автомобильное колесо

Ограничимся исследованием качения ведущего колеса при ускоренном, равномерном и замедленном прямолинейном движении, когда отсутствуют боковые силы.

Основоположник теории автомобиля акад. Е.А. Чудаков [1] подробно рассмотрел этот случай и привёл схему нагружения ведущего колеса автомобиля, которая с учётом принятых им же допущений представлена на рис. 1, где обозначено: G_2 — часть силы тяжести автомобиля, приходящаяся на ведущее колесо; Z_2 — нормальная реакция опорной поверхности, смещённая от вертикального диаметра колеса по ходу движения на расстояние a, равная силе G_2; M — тяговый момент, подведённый от двигателя автомобиля к ведущему колесу; P — сила тяги, создаваемая в точке контакта ведущего колеса с дорогой, являющаяся тангенциальной реакцией опорной поверхности на ведущее колесо, $P = M/r$; P_1 — сила, передаваемая на ведомую ось автомобиля; M_{jk} — момент сопротивления ускоренному вращению ведущего колеса.

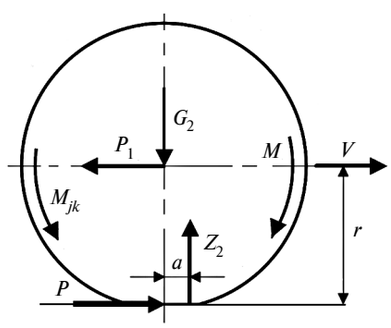

Рис. 1. Силы и моменты, действующие на ведущее колесо при ускоренном движении автомобиля

av1019.fm Page 22 Thursday, September 26, 2019 10:36 AM

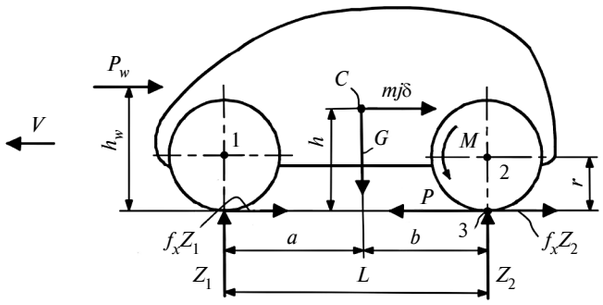

Рис. 2. Силы, действующие на заднеприводный двухосный автомобиль при разгоне на горизонтальном участке дороги

Заметим, на момент зарождения теории автомобиля — в начале XX века — скорости движения были невелики и сопротивлением воздуха, которое находится в квадратичной зависимости от скорости движения, можно было пренебречь. Действительно, до скорости движения 50 км/ч сопротивление воздуха мало ощутимо, но затем начинает резко возрастать по параболе, становясь естественным ограничителем максимальной скорости автомобиля. Очевидно, что при расчёте современных высокоскоростных колёсных машин пренебрежение силой сопротивления воздуха, превосходящей прочие сопротивления, недопустимо.

Теория движения автомобиля может дать результаты, подтверждаемые экспериментально и практикой эксплуатации автомобиля, только в том случае, когда она учитывает влияние всех приложенных к автомобилю сил. Но разве в приведённой схеме учтены сила P_w сопротивления воздуха и приведённая сила $mj\delta$ инерции (рис. 2), которые вместе со всеми силами, приложенными к автомобилю, реализуются в точке контакта ведущего колеса с дорогой? Конечно, нет. В традиционной теории движения автомобиля [1—25] принимают борта автомобиля совмещёнными. Считается, что в вертикальной плоскости к нему приложены продольные силы, параллельные опорной поверхности автомобиля.

Наивысшие проверяемые технические характеристики (приёмистость, максимальная скорость, минимальный тормозной путь) автомобиля, как твёрдого тела, получают во время дорожных испытаний при прямолинейном движении на горизонтальном (угол подъёма $\alpha = 0$) участке асфальтобетонной дороги. Эти условия проведения экспериментов позволяют исследовать динамику автомобиля без ощутимого ущерба для точности результатов.

Рассмотрим силы, приложенные к двухосному автомобилю на разных высотах относительно опоры (земной) поверхности, в режиме ускоренного прямолинейного движения на горизонтальном участке дороги (рис. 2).

Автомобиль, как твёрдое тело, от природы имеет центры масс, парусности и контакта ведущего колеса с дорогой. В центре масс C, на высоте h от опорной поверхности, приложены сила тяжести G, приведённая сила инерции $mj\delta$ (где mj — сила инерции поступательно движущихся масс; m, j — масса и ускорение; δ — коэффициент учёта вращающихся масс). В центре парусности, на высоте h_w, приложена сила P_w сопротивления воздуха.

В контакте ведущего колеса с дорогой создаются нормальная реакция Z_2 дороги и соответствующая ей движущая сила P тяги, представляющая собой окружную (касательную, тангенциальную) реакцию дороги на момент M, подведённый к ведущему колесу, $P = M/r \le \varphi_x G_2$, где φ_x — коэффициент продольного сцепления шин с дорогой. Кроме нормальных реакций Z_1 и Z_2 в контакте колёс с поверхностью дороги возникают силы сопротивления качению f_xZ_1 и f_xZ_2, сумма которых равна $f_x(Z_1 + Z_2) = f_xG$, где f_x — коэффициент сопротивления продольному качению колёс. Индексы при параметрах означают принадлежность к ведомой (1) или ведущей (2) оси.

Одна из основных ошибок теории автомобиля состоит в проецировании действующих на него сил на виртуальную прямую, совершающую плоское движение в пространстве, вне связи с окружающей средой [17]. Ясно, что движение автомобиля без связи с земной поверхностью (дорогой), т.е. без возникновения в точках контакта колёс с дорогой нормальных и тангенциальных реакций опорной поверхности, невозможно. Проецирование этой системы параллельных сил, находящихся в вертикальной плоскости, на одну линию действия вместо их приведения — неправильно, что было ранее показано авторами в ряде публикаций.

Так как все силы, приложенные к автомобилю, реализуются в точке *3* контакта ведущего колеса с дорогой, то задача расчёта движения автомобиля сводится к приведению действующих на него сил к центрам моментов, каковыми являются ось *2* ведущих колёс и точка *3* контакта ведущего колеса с дорогой. Перенос сил производится на основе теоремы о параллельном переносе силы, которая гласит: *силу, приложенную к абсолютно твёрдому телу, можно, не изменяя оказываемого действия, переносить параллельно ей самой в любую точку тела, прибавляя при этом пару с моментом, равным моменту переносимой силы относительно точки, куда сила переносится* [18]. В ряде источников эту теорему называют методом Пуансона.

Покажем использование этой теоремы на примере расчёта движения автомобиля.

Пусть на твёрдое тело (автомобиль) действует к примеру сила P_w, приложенная в точке центра парусности, расположенного на высоте h_w, которую необходимо привести к центрам моментов (рис. 3, *а*).

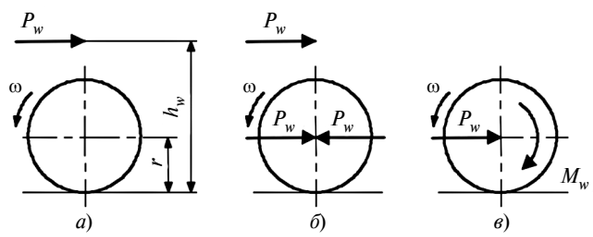

Рис. 3. Приведение силы P_w сопротивления воздуха (а) к оси вращения ведущих колёс (б и в)

av1019.fm Page 23 Thursday, September 26, 2019 10:36 AM

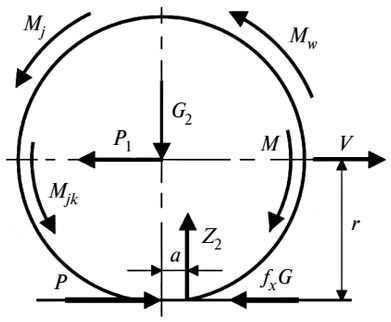

Рис. 4. Силы и моменты, действующие на ведущее колесо, приведённые к оси колеса при ускоренном движении автомобиля

Расчётной схеме (рис. 3, *а*) эквивалентна схема (рис. 3, *б*), так как две противоположно направленные по одной линии силы одинаковой величины взаимно уравновешиваются. Далее схема (рис. 3, *б*) эквивалентна схеме (рис. 3, *в*), в которой в результате переноса силы P_w к оси колеса образовался момент, равный $M_w = P_w(h_w - r)$.

При расчёте движения автомобиля необходимо провести аналогичные операции со всеми силами, приложенными к автомобилю вне центров моментов, с помощью теории пары двух противоположно направленных сил, разработанной Пуано. В результате получим реальную картину нагружения ведущего колеса автомобиля (рис. 4), приводя силы P_w и P_j к его оси, подобно (рис. 3, *в*).

В схеме, приведённой на рис. 4, дополнительно учтены: в параметре P_1 силы P_w, P_j и возникающие при их переносе на ось ведущего колеса моменты M_w, M_j; сумма моментов $M_{jк}$ сопротивления ускоренному вращению всех колёс автомобиля; сила f_xG сопротивления качению колёс автомобиля весом G. Максимальное значение силы P тяги ограничено силой сцепления шин с дорогой, $P \le P_\varphi = \varphi_x G_2$, где P_φ — сила сцепления шин с дорогой, φ_x — коэффициент продольного сцепления.

Для равномерного движения, вплоть до максимально возможной скорости автомобиля, картина нагружения ведущего колеса упростится из-за отсутствия инерционных составляющих. В доступной же нам литературе полной схемы качения ведущего колеса со всеми действующими на него нагрузками нет, а без их учета расчёт движения автомобиля неточен.

Литература

1. Чудаков Е.А. Избранные труды. Том 1. Теория автомобиля. — М.: Изд-во АН СССР, 1961. — 464 с.
2. Зимелев Г.В. Теория автомобиля. — М.: Машгиз, 1959. — 312 с.
3. Фалькевич Б.С. Теория автомобиля. — М.: Машгиз, 1963. — 240 с.
4. Антонов А.С., Кононович Ю.А., Магидович Е.И., Прозоров В.С. Армейские автомобили. Теория. — М.: Воениздат, 1970. — 527 с.
5. Гришкевич А.И. Автомобили: Теория. — Минск: Вышэйшая школа, 1986. — 208 с.
6. Литвинов А.С., Фаробин Я.Е. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств. — М.: Машиностроение, 1989. — 237 с.
7. Скотников В.А., Мащенский А.А., Солонский А.С. Основы теории и расчета трактора и автомобиля. — М.: Агропромиздат. 1986. — 383 с.
8. Кутьков Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства. — М.: КолосС, 2004. — 504 с.
9. Вахламов В.К. Автомобили. Эксплуатационные свойства. — М.: ИЦ "Академия", 2006. — 240 с.
10. Мамити Г.И., Льянов М.С., Агузаров Т.Т. и др. Составление уравнений динамической системы при торможении // Материалы междунар. НПК, посвящён. 90-летию Горского ГАУ. — Владикавказ, 2008. — С. 428—432.
11. Селифонов В.В. Теория автомобиля. — М.: ООО "Гринлайт", 2009. — 208 с.
12. Мамити Г.И. Теория движения двухосной колёсной машины. — Владикавказ: Изд-во ФГБОУ ВПО "Горский госагроуниверситет", 2012. В двух книгах. — 216 с.; 168 с.
13. Мамити Г.И. Прорыв в науке? Пусть ответит непредвзятый читатель // Автомобильная промышленность. — 2017. — № 7. — С. 21—30.
14. Мамити Г.И. Влияние на скорость движения автомобиля радиуса колёс и высот расположения центров парусности и масс // Автомобильная промышленность. — 2018. — № 2. — С. 15—17.
15. Мамити Г.И., Льянов М.С., Ким В.А. Использование основного понятия механики сила, в теории движения и расчёте механизмов автомобиля // Автомобильная промышленность. — 2018. — № 6. — С. 18—20.
16. Мамити Г.И. Достижения Горского ГАУ в машиностроении // Материалы междунар. НПК, посвященной 100-летию Горского ГАУ 29—30 ноября 2018. Часть 1. — Владикавказ, 2018. — С. 309—312.
17. Мамити Г.И. Новая теория движения автомобиля // Автомобильная промышленность. — 2019. — № 1. — С. 20—24.
18. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. — М.: Наука, 1968. — 480 с.
19. Jante A. Zur Theore des Kraftwagens (Янте А. Механика движения автомобиля. Пер. с нем. — М.: Машгиз, 1958. — 263 с.).
20. Taborek J.J. Mechanics of Vehicles (Таборек Я. Механика автомобиля. Пер. с англ. — М.: Машгиз, 1960. — 207 с.).
21. Ellis J.R. Vehicle Dynamics (Эллис Д.Р. Управляемость автомобиля. Пер. с англ. М.: — Машиностроение, 1976. — 216 с.).
22. Wong J.Y. Theore of ground Vehicles (Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств. Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1982. — 284 с.).
23. Georg Rill. Vehicle Dunamics. Lecture Notes. University of applied sciences. October 2006, 470 p.
24. Reza N. Jazar. Vehicle Dynamics. Theory and Application. Springer Science + Business Media LCC 2008, 1015 p.
25. Hans B. Pacejka. Tyre and Vehicle Dynamics. Second edition. Butterworth — Heinemann is an imprint of Elsevier, 2006, 642 p.