

Исследование гистерезисных потерь при взаимодействии пневматического колёсного движителя с несущей поверхностью

Ю.Г. Горшков, д.т.н., И.Н. Старунова, к.т.н.,
А.А. Калугин, к.т.н., Челябинская ГАА;
И.В. Гальянов, д.т.н., Орловский ГАУ

Процесс движения колёсных машин осуществляется за счёт взаимодействия пневматического колёсного движителя с опорной поверхностью. Это взаимодействие вызывает значительные энергетические потери, характеризующие экономичность машины, её тягово-сцепные свойства и проходимость [1–3].

Для наиболее эффективного использования различных марок шин и повышения производительности колёсных машин целесообразно исследовать потери энергии на качение пневматического колеса по различным типам несущих поверхностей [4].

Величина потерь на качение является существенной характеристикой шины как с точки зрения влияния шины на динамику и экономичность колёсной машины, так и с точки зрения прочности самой машины [2, 5, 6].

В процессе качения колеса шина деформируется под воздействием различных непрерывно изменяющихся сил, которые вызывают многократные деформации её элементов [7]. Эти деформации сопровождаются большими потерями энергии, вследствие чего шина значительно нагревается и изменяет свои основные свойства (упругость, деформативность, противостояние действию механических нагрузок и т.п.). Изменение её свойств влияет как на экономичность всей машины, так и на безопасность дорожного движения [8]. Поскольку потери на качение шины связаны в основном с потерями на внутреннее трение в резине и корде, их величина зависит от свойств этих материалов и от величин испытываемых ими деформаций [2].

Измерение деформаций элементов шин (гистерезиса) связано со значительными затруднениями и, как правило, проводится на стендовом оборудовании без учёта реальных условий качения шины. Для исследования интенсивности деформаций шин на различных несущих поверхностях при различных эксплуатационных условиях необходимо специальное оборудование.

Для этой цели предлагается устройство, с помощью которого можно исследовать радиальную деформацию шины в контакте с несущей поверхностью. Эта деформация, в свою очередь, зависит от прогиба шины и её конструкции (углы нитей корда, тип и глубина рисунка протектора, материала шины и др.).

Работа данного устройства основана на том, что при увеличении нагрузки на колесо в результате деформации шины её внутренний объём уменьша-

ется. Так как количество воздуха в шине остаётся постоянным, то уменьшение объёма шины приводит к повышению давления воздуха в ней. Это подтверждается законом Бойля–Мариотта, согласно которому при постоянной температуре объём данной массы газа обратно пропорционален давлению:

$$P_u \cdot V_u = const, \quad (1)$$

где P_u – давление воздуха в шине, Па;

V_u – внутренний объём шины, м³.

По формуле (1) видно, что уменьшение внутреннего объёма шины влечёт за собой повышение внутришинного давления.

Принципиальная схема этого устройства приведена на рисунке 1. Устройство устанавливается на ступице колеса машины (например, автомобиля) при помощи фланца 1. При движении автомобиля корпус 2 устройства вращается вместе со ступицей колеса, вращается и шестерня 5 корпуса. Вращение шестерни 5 передаётся на шестерню приёмной кассеты 14, ось которой закреплена на подвижном маховике 3. На нём же установлена подающая кассета 15. Центр тяжести маховика находится ниже его оси вращения, и поэтому при движении автомобиля маховик занимает определённое положение.

Разъём воздухопровода 10 подсоединяется к ниппелю камеры колеса. При открытом вентиле давление в смежных камерах С и D устройства соответствует давлению в камере колеса автомобиля. На период испытаний вентиль 11 закрывается. Вращаясь, кассета 14 наматывает на себя регистрационную ленту, поступающую с кассеты 15 через обрешиненный ролик 6.

При изменении нагрузки на колесо давление в шине меняется и меняется в камере С. В зависимости от разности давления в камерах С и D мембрана 12 прогибается. Шток 13, жёстко связанный с мембраной 12, перемещается и действует на рычажную систему 9 самописца, перо которого движется в плоскости, перпендикулярной плоскости перемещения ленты.

На рисунке 2 показана диаграмма изменения (деформации) давления в камере шины при движении автомобиля. На рисунке 2 видно, что при движении машины давление воздуха в шине может резко повышаться при динамических ударах на колесо (области 1, 2) относительно давления в статическом состоянии P_{cm} , а также приближаться к давлению при вывешенном состоянии колеса в результате его разгрузки при определённых условиях (области 2, 4).

Также можно определить среднее значение давления воздуха в шине при её движении на определённом участке пути:

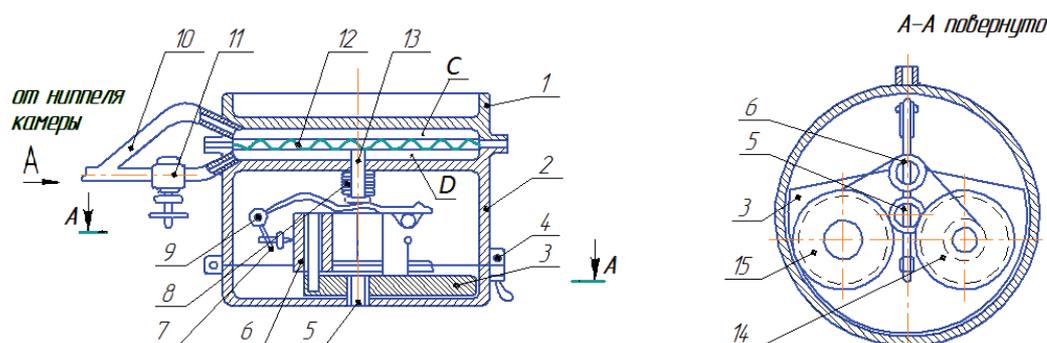


Рис. 1 – Принципиальная схема прибора для исследования гистерезисных потерь в пневматической шине:
 1 – фланец; 2 – корпус прибора; 3 – маховик; 4 – разъем крепления крышки и корпуса; 5 – шестерня; 6 – ролик;
 7 – самописец; 8 – пружина; 9 – рычажная система самописца; 10 – воздухопровод; 11 – вентиль; 12 – мембрана;
 13 – шток; 14, 15 – кассеты

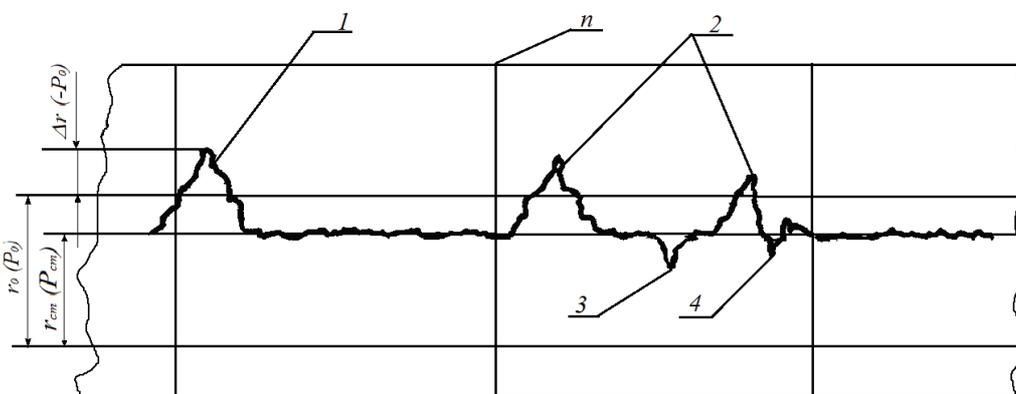


Рис. 2 – Фрагмент диаграммы изменения давления в камере шины при движении автомобиля:
 n – линия отметчика оборотов; P_{cm} и P_o – давление в камере шины при статической нагрузке и свободном состоянии; $(-P_o)$ – приращение свободного радиуса колеса (снижение давления в камере шины) от инерционных сил

$$P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ui}}{m}, \quad (2)$$

где P_{cp} – среднее значение давления воздуха в шине, Па;

P_{ui} – значение давления воздуха в шине в 1-й точке, Па;

m – количество учитываемых значений давления воздуха в шине.

Испытания проводились на автомобиле «ЗиЛ-413300» с универсальным рисунком протектора. Длина испытуемого участка составляла 100 м. Испытания проводились на несущей поверхности из асфальтобетона.

Данное устройство целесообразно использовать для проведения единичных экспериментальных исследований. Для условий эксплуатации можно использовать это же устройство, но оснащённое электронным датчиком (вместо самописца) и передающим устройством (блоком), с помощью которых информация поступает в приёмник (электронный счётчик, осциллограф), находящийся в кабине оператора мобильной колёсной машины. В этом случае можно использовать монтируемые на ниппеле пневматической шины системы электронных датчиков типа TPMaster 4-27, Carax TPMS CRX-1050/CRX 1001, Phantom CA 2530 [9].

С помощью предлагаемого устройства можно проводить и мониторинг изменения давления воздуха в шинах во время их эксплуатации. В частности, устройство позволит определить мгновенное повышение давления при ударных нагрузках на колесо. Данная информация будет весьма полезна разработчикам при расчёте и совершенствовании конструкции пневматических колёс.

Кроме того, имеющаяся взаимосвязь между давлением воздуха в шине и другими характеристиками пневматического колеса позволит по изменению давления определять затраты энергии на качение колёсной машины. В целом исследования по совершенствованию пневматического колеса с помощью предлагаемого устройства повысят технико-экономические показатели колёсных машин и безопасность дорожного движения.

Как уже отмечалось выше, причинами возникновения сопротивления качению являются следующие факторы: потери внутренней энергии шины при её непрерывном качении (гистерезисные потери) в зонах деформирования и восстановления её профиля, составляющие до 90% всех потерь; потери энергии при скольжении шины по поверхности дороги, составляющие 5–9% всех потерь; потери энергии из-за аэродинамического сопротивления, возникающие при вращении шины, составляющие 1–5% всех потерь. Влияние этих факторов непо-

стоянно и изменяется в зависимости от скорости движения машины, условий её торможения и дорожных условий [10].

В связи с этим рассмотрим мощностной баланс пневматического колеса при равномерном движении колёсной машины (сопротивлением воздуха из-за малой величины пренебрегаем) по ровной дороге [8]:

$$N_k = N_n + N_f + N_{\delta}, \quad (3)$$

где N_k – мощность, подведённая к ведущему колесу;

N_n – полезная мощность;

N_f – мощность, затраченная на качение;

N_{δ} – мощность, затраченная на буксование.

$$N_f = N_2 + N_{адз} + N_o, \quad (4)$$

где N_2 – мощность, затраченная на внутреннее трение в материалах шины (на гистерезис);

$N_{адз}$ – мощность, затраченная на адгезионные потери;

N_o – мощность, затраченная на смятие грунта и образование колеи.

Из выражения (3) с учётом (4) определим мощность, расходуемую на сопротивление движению:

$$N_{comp} = N_f + N_{\delta} = N_2 + N_{адз} + N_o + N_{\delta}. \quad (5)$$

Уравнение для равномерного движения (буксование отсутствует) по твёрдой дороге можно записать в виде:

$$N_{comp} = N_2 + N_{адз} + N_o. \quad (6)$$

Принимая во внимание, что от внутреннего давления воздуха в шине зависят гистерезисные потери в ней и величина деформации грунта, влияющие на сопротивление перекачиванию колеса, и неизбежность этих потерь для эластичного колеса, можно заключить, что гистерезисные потери целесообразно учитывать отдельно от затрат энергии на деформацию грунта и образование колеи.

Затраты мощности на гистерезисные потери в шине можно найти по уравнению:

$$N_2 = f \cdot P \cdot V_k, \quad (7)$$

где f – коэффициент сопротивления качению;

P – суммарная нагрузка, приходящаяся на колесо;

V_k – линейная скорость движения оси колеса.

При динамометрировании испытуемого автомобиля сила сопротивления перекачиванию P_f определяется как $f \cdot G_a$, откуда:

$$f = \frac{P_f}{G_a}, \quad (8)$$

где G_a – вес автомобиля;

$$V_k = \pi \cdot r_{cp} \cdot n_k, \quad (9)$$

где r_{cp} – средний радиус колеса (м);

n_k – обороты колеса.

Средняя величина деформации шины h_{cp} и нагрузка P_{cp} определены планиметрированием необходимого участка ленты устройства (рис. 2). В соответствующих масштабах:

$$P_{cp} = \frac{S}{L}, \text{ мм}; \quad h_{cp} = \frac{S}{L}, \text{ мм}, \quad (10)$$

где S – площадь участка диаграммы;

L – длина участка диаграммы.

Перед постановкой опыта предварительно тарируются приборы, а также определяется влияние нагрузки на величину деформации шины $h = f(p)$.

В целом для автомобиля с колёсной формулой 4×4 мощность, затрачиваемую на гистерезисные потери, находим по выражению (рис. 2):

$$N_2 = f \cdot (P_1 \cdot V_{к1} + P_2 \cdot V_{к2} + P_3 \cdot V_{к3} + P_4 \cdot V_{к4}). \quad (11)$$

Средний радиус колеса r_{cp} определяем из равенства:

$$r_{cp} = r_o + \Delta r_o - h_{cp},$$

где r_o – свободный радиус колеса;

Δr_o – приращение свободного радиуса колеса под действием центробежных сил при отрыве его от дороги.

Определив с помощью прибора мощность N_2 , затраченную на гистерезис, и мощность N_f при равномерном движении по твёрдой дороге, вычислим мощность, затраченную на адгезионные потери:

$$N_{адз} = N_f - N_2. \quad (12)$$

Адгезионные потери остаются практически постоянными при определённых условиях (скорость, вертикальная нагрузка на колёса и т.п.). Поэтому можно принять $N_{адз} = const$ для твёрдой и деформируемой поверхности.

При качении колеса по деформируемому грунту мощность расходуется на смятие грунта и образование колеи. Определить её можно по уравнению:

$$N_o = N_f - N_2 - N_{адз}. \quad (13)$$

Следовательно, баланс мощности пневматического колеса можно записать в виде:

$$N_k = N_n + N_2 + N_{адз} + N_o + N_{\delta}. \quad (14)$$

Анализ последней формулы даёт возможность при создании новых конструкций пневматических движителей и эксплуатации старых моделей выявлять наибольшие значения составляющих энергетических потерь и причины их изменения. Таким образом, по уравнению (14) можно сопоставлять различные конструкции шин с точки зрения потерь на качение, а также выбирать более экономичные типы колёс для новых и существующих моделей колёсных мобильных средств.

Для уменьшения коэффициента f или снижения затрат энергии (топлива) на качение колёсных машин необходимо определить соответствие

внутреннего давления воздуха в шинах различным условиям движения и на этой основе разработать рекомендации по поддержанию оптимального давления в шинах.

Главным направлением снижения коэффициента сопротивления качению f является улучшение рецептуры материала шины с точки зрения уменьшения внутренних потерь энергии. При этом будет снижаться и нагрев пневматической шины, ухудшающий механическую прочность и повышающий утомляемость резинотканевых элементов покрышки. С учётом отмеченного снижение внутренних потерь энергии в пневматических шинах весьма важно с точки зрения как экономичности колёсных средств, так и безопасности дорожного движения.

Литература

1. Бойков В.П., Белковский В.Н. Шины для тракторов и сельскохозяйственной техники. М.: Агропромиздат, 1988.
2. Бидерман В.Л. и др. Автомобильные шины (конструкция, расчёт, испытание, эксплуатация). М.: Госхимиздат, 1963. 384 с.
3. Балабин И.В., Путин В.А. Автомобильные и тракторные колёса. Челябинск: Юж.-Ур. кн. изд-во, 1963.
4. Белковский В.Н. и др. Шины для сельскохозяйственной техники: спр. изд. М.: Химия, 1986.
5. Новопольский В.И. Экспериментальное исследование потерь на качение автомобильного колеса // Автомобильная и тракторная промышленность. 1954. № 1.
6. Агейкин Я.С. Исследование работы шин переменного давления на деформируемом грунте // Проблемы повышения проходимости колёсных машин: сб. статей АН СССР. М., 1959.
7. Бабков В.Ф. и др. Проходимость колёсных машин по грунту. М.: Автотрансиздат, 1959.
8. Горшков Ю.Г. Повышение эффективности функционирования системы «дифференциал пневматический колёсный движитель – несущая поверхность» мобильных машин сельскохозяйственного назначения: дисс. ... докт. техн. наук. Челябинск, 1999. 311 с.
9. Коханенко В.Б., Соколовский С.А., Яковлев А.М. Влияние работы трения пневматической шины на расход топлива автомобилей // Вісник СНУ ім. Володимира Даля. 2012. № 9 (180). Ч. 1.
10. Автоэлектроника в руках профессионалов!: интернет-каталог электронного магазина автомобильных запчастей. URL: <http://avtoprofi.ru>