

Исследование динамического потенциала шины на поверхностях, покрытых слоем льда

© А.А. Купреянов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Статья содержит не столь широко известные данные, взятые из литературных источников, о потенциальной возможности увеличения трения шины на льду при динамическом нагружении шины крутящим моментом. Проведены экспериментальные и аналитические исследования трения резины по льду и представлена идентификация динамического потенциала шины на ледяной поверхности.

Ключевые слова: трение эластомера, вязкоупругость, динамический потенциал шины.

Введение. Исследование взаимодействия шины с поверхностью, покрытой слоем льда, представляет особый интерес, поскольку движение автомобиля по такой поверхности часто сопровождается многочисленными авариями. Наиболее опасные ситуации возникают на дорогах поздней осенью и ранней весной, когда температура ночью меньше нуля, а днем — больше нуля. Тонкий слой воды на поверхности льда усугубляет ситуацию. Даже при попытке преодоления автомобилем подъема с малой скоростью может произойти потеря подвижности автомобиля, как следствие, возникают «пробки» и многочисленные аварии. Еще более опасная ситуация возникает, когда автомобиль въезжает на эстакаду, двигаясь по криволинейной траектории.

Одним из способов борьбы с подобными явлениями является использование шипованных или нешипованных зимних шин. Эффективность тех или иных шин зависит от конкретных погодных условий.

По мнению многих исследователей и испытателей, зимние шины с «отсосом» воды из зона контакта (например, фирмы Bridgestone) оказываются более эффективными, чем шины с шипами. За рубежом в ряде стран (США, Канада, Швеция, Финляндия, Норвегия) придается очень большое значение исследованию сцепляемости шин в зимних условиях. Можно также назвать несколько крупных исследовательских центров (Лаборатория США по проектированию и исследованию холодных регионов, Институт по исследованию снега Мичиганского технологического университета и т. д.).

Созданы специальные установки для изучения трибологических характеристик на поверхности, покрытой слоем льда: UG — для ка-

чественного определения сил трения и обеспечения сцепляемости в зимних условиях; CIV — испытательно-измерительная установка для улучшения тягово-сцепных свойств в холодных регионах Лаборатории армии США; установка фирмы SAAB — для оценки сил трения (и обеспечения безопасности посадки самолета на поверхность взлетной полосы).

Рядом исследователей отмечено влияние интенсивности нарастания подводимого к колесу тягового крутящего момента на пиковую реализуемую тангенциальную реакцию в контакте [1, 2]. Так, в работе [2] приведены результаты экспериментальных исследований влияния темпа нарастания подводимого к колесу крутящего момента для автомобиля, находящегося на поверхности льда на этапе начала движения.

На рис. 1 показаны результаты исследования влияния скорости нарастания крутящего момента на пиковую реализуемую силу тяги в контакте. Из рисунка следует, что при плавном изменении подводимого к колесу крутящего момента его пиковое значение (и тангенциальной реакции в контакте) примерно в 2,5 раза меньше, чем при резком нарастании момента. В обоих случаях после разрушения связей в контакте и начале скольжения подводимый к колесу момент резко уменьшается и начинается процесс буксования колеса. В работе [2] описано явление, называемое эффектом DTFP (dynamic tire friction potential). Этот эффект объясняется тем, что до того, как разрушился контакт шины со льдом и начала образовываться тонкая водяная пленка, область контакта может передать момент, который в несколько раз превосходит момент при плавном нагружении. При плавном нагружении постепенно разрушаются связи в пятне контакта и начинается процесс интенсивного скольжения.

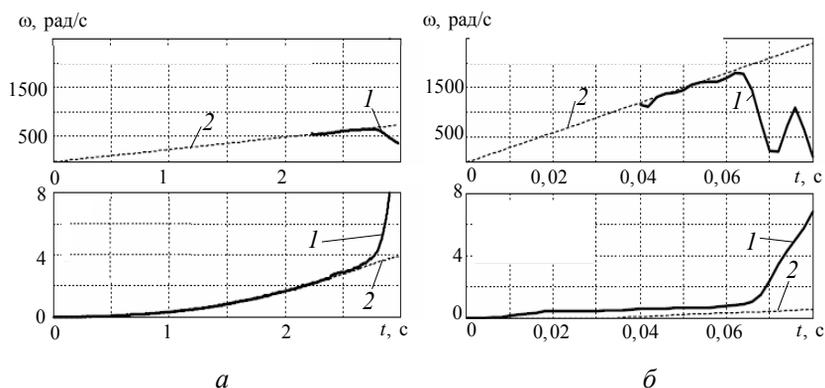


Рис. 1. Влияние скорости возрастания момента, подводимого к колесу на максимальную тангенциальную силу на льду:
 1 — переднее колесо, 2 — заднее колесо

В настоящей работе показано, что подобные эффекты могут возникать и на других поверхностях (в частности сухих, мокрых и загрязненных асфальтобетонных поверхностях), при динамическом нагружении грунтов и т. д. [3–7]. В этом случае физическая модель взаимодействия шины с поверхностью будет другой.

При взаимодействии шины со льдом существенное значение имеет длительность контакта до начала движения (эффект «примерзания»). На установке УТУ-3 автором данной работы совместно с Е.О. Румянцевым были проведены экспериментальные исследования силы трения скольжения при взаимодействии эластомера (протекторной резины) с ледяной поверхностью. Предварительно воду заливали в полость нижнего подвижного образца и замораживали в морозильной камере.

На рис. 2 установка УТУ-3 показана в собранном виде для испытаний пары эластомер – лед. Испытания проходили в стационарных и нестационарных условиях. В стационарных условиях измеряли силу трения при изменении входных параметров (нормальной нагрузки, температуры и частоты вращения диска) для ряда дискретных значений нормальной нагрузки N_i (при номинальном давлении p_{a_i}) и частоты вращения рабочего стола n_i . Кроме испытаний в стационарных условиях проводили испытания с помощью специального приспособления в нестационарных режимах при различном темпе нарастания крутящего момента, подводимого к нижнему подвижному образцу установки УТУ-3.



Рис. 2. Общий вид установки УТУ-3

На рис. 3 показаны образцы записи изменения силы трения (и коэффициента трения) в контакте пары трения эластомер – лед

при различных значениях частоты вращения нижнего образца. Результаты измерения силы трения в зависимости от нагрузки (22,5 Н) и частоты вращения приведены ниже:

Частота вращения, об/с...	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,0
Среднее значение силы трения, Н...	11	7,5	6	5	3,5	3

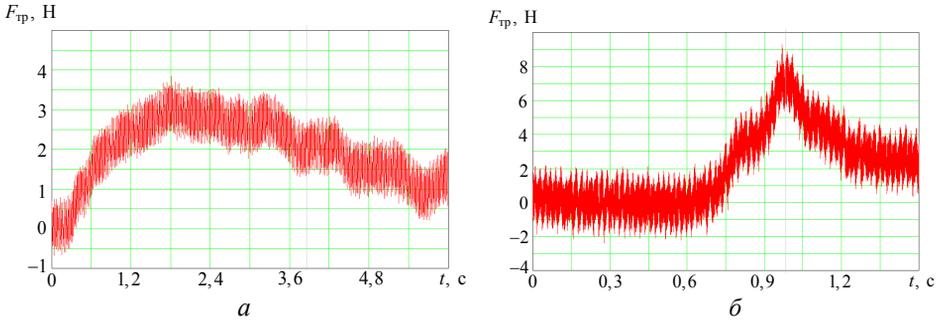


Рис. 3. Изменение силы трения $F_{тр}$ от времени при плавном нарастании тангенциальной силы (а) и средней интенсивности (б) при нормальной нагрузке $N = 60$ Н

По частоте вращения нижнего образца можно рассчитать скорость скольжения в контакте.

Были записаны изменения силы трения в контакте при различной интенсивности нарастания тангенциальной нагрузки (рис. 3). Результаты измерений приведены на рис. 4 при различных значениях нормальной нагрузки N .

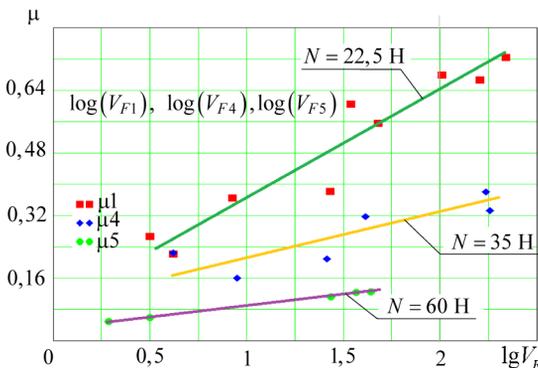


Рис. 4. Зависимости реализуемого на льду коэффициента трения μ от интенсивности возрастания тангенциальной нагрузки, V_F , Н/с

Результаты экспериментальных исследований пары трения эластомер – лед (протекторная резина – лед) позволяют сделать ряд вы-

водов, которые относятся к свойствам сформированного слоя льда для конкретных условий испытаний на установке УТУ-3.

1. В стационарных условиях коэффициент трения элемента эластомера на льду заметно уменьшается при повышении номинального давления p_a , действующего на элемент эластомера.

2. В стационарных условиях коэффициент трения пары эластомер – лед заметно уменьшается с ростом скорости скольжения на льду.

3. При изменении скорости приложения тангенциальной нагрузки реализуемая в контакте сила до начала скольжения (и коэффициент трения) на льду возрастает с ростом скорости приложения нагрузки. При этом «мгновенный коэффициент трения» до начала скольжения может возрасти в несколько раз.

4. Вышеуказанный эффект наблюдается при различном значении номинального давления в контакте. Причем возрастание реализуемой силы (и коэффициента трения) оказывается более значительным при меньшем значении номинального давления p_a .

5. Полученные результаты в нестационарных условиях нагружения хорошо согласуются с результатами, опубликованными в научно-технической литературе [2].

Как следует из рис. 1, при плавном и резком приложении крутящего момента после разрушения контакта и начала интенсивного скольжения начинается буксование колеса и автомобиль может потерять подвижность. Причем при резком приложении момента, он затем уменьшается более значительно, чем при плавном. Именно поэтому водители автомобилей пытаются плавно увеличивать тяговый крутящий момент на колесах.

Вместе с тем приведенные в статье результаты экспериментальных исследований показывают, что существует возможность создания алгоритма управления подводимым крутящим моментом, когда автомобиль движется по ледяной поверхности. Для этого необходимо знать предельный крутящий момент, соответствующий интенсивности нарастания крутящего момента. Отметим, что созданы автомобили с электромеханической трансмиссией и сложными мехатронными системами, что обуславливает широкие возможности управления подводимыми тяговыми или тормозными крутящими моментами, перераспределения потоков мощности и крутящего момента, подводимых к различным ведущим колесам автомобиля [8–11].

Можно построить адаптивный алгоритм управления, который позволит системе управления получить необходимую информацию при движении по поверхности, покрытой слоем льда. Чтобы попытаться разработать такой алгоритм для автомобиля с электромеханической или гибридной трансмиссией было принято решение постро-

ить подобный алгоритм для физической модели автомобиля с электромеханической трансмиссией.

Целью этих испытаний является возможность проверить описанный выше эффект в широком диапазоне изменения входных параметров. В частности, можно будет сравнить предельные сцепные возможности автомобиля при плавном приложении крутящего момента и в случае приложения момента с определенной частотой и амплитудой с тем, чтобы попытаться использовать описанные выше эффекты. Подчеркнем, что в данной работе не ставится цель получить результаты на физической модели и попытаться перенести их, используя теорию подобия, непосредственно на натуральный образец. Тем не менее такие эксперименты могут дать достаточно информации, чтобы перейти к разработке алгоритма управления крутящими моментами для автомобиля.

В качестве объекта испытания выбрана модель автомобиля типа Traxxas E-Revo 1/16, основные характеристики которой приведены ниже:

- масштаб модели 1/16
- длина модели 328 мм
- передняя колея 239 мм
- высота 117 мм
- диаметр колеса 90 мм
- колесная база 202 мм
- электродвигатель Traxxas Titan 12T550
- масса модели 1,24 кг
- трансмиссия одноступенчатая
- общее передаточное число 15,75
- привод полный или на одну ось

Характеристики электродвигателя:

- наименование двигателя Traxxas Titan 12T550
- тип двигателя коллекторный (постоянного тока)
- мощность 200 Вт
- количество витков 12
- напряжение 4,8 ... 9,6 В
- рабочее напряжение 7,2 В
- максимальная частота вала двигателя ... 22 000 об/мин
- максимальный КПД электродвигателя 0,7

В соответствии с целями и задачами исследований была разработана упрощенная электромеханическая модель автомобиля. На рис. 5 представлен общий вид модели, которая может передвигаться по горизонтальной поверхности или двигаться на подъем.

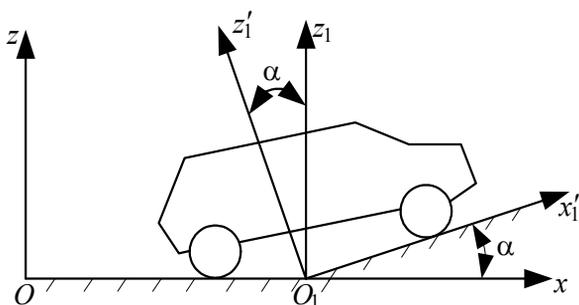


Рис. 5. Расчетная схема движения автомобиля (α — угол подъема опорной поверхности)

На этапе разработки алгоритма управления рассматриваются режимы, когда моменты на колесах не достигают своих предельных значений, колеса считаются жесткими и пробуксовывание отсутствует. Обычно для электромеханических трансмиссий при необходимости управления подводимым крутящим моментом разрабатывают алгоритм, который позволяет управлять током и, следовательно, крутящим моментом.

Для проведения испытаний физической модели автомобиля необходимо использовать источник тока, однако ввиду технических сложностей было принято решение использовать генератор напряжения.

Ниже показано, что разработанный алгоритм управления позволяет достичь улучшения тягово-сцепных свойств при импульсном управлении крутящими моментами.

Таким образом, математическая модель автомобиля при движении описывается следующими уравнениями:

$$\frac{G_a}{g} \frac{dV_x}{dt} = \frac{M_{gb}(t)i_{тр}\eta_{тр}}{r} - \frac{\sum M_{fi}}{r} - G_0 \sin \alpha, \quad (1)$$

$$U = U(t), \quad U = U_{gl} + J_A \cdot R_{я}, \quad (2)$$

$$M_{дв} = K\Phi J_{я} \eta_{эм}(U_{дв}), \quad (3)$$

$$\omega_{дв} = \frac{U_{дв}(t) - J_{я}R_{я}}{K\Phi}. \quad (4)$$

Здесь G_a — вес автомобиля (модель); V_x — проекция скорости автомобиля на ось X (см. рис. 5); $i_{тр}$ — передаточное число трансмиссии; δ — коэффициент, учитывающий вращающиеся массы; $U(t)$ — задаваемое напряжение; r — радиус колеса; $\eta_{эм} = \eta(U)$ — коэффициент полезного действия электродвигателя в зависимости от подво-

димого напряжения; $\sum_{i=1}^n M_{fi}$ — суммарный момент сопротивления качению; $\sum_{i=1}^n M_{fi} = G_a f_a r$; $\omega_{\text{дв}}$ — угловая скорость вала двигателя; $J_{\text{я}}, R_{\text{я}}$ — сила тока и сопротивление якоря соответственно; Φ — магнитный поток; $V_x = \frac{\omega_{\text{дв}}}{i_{\text{тр}}} \cdot r$

Система уравнений (1)–(4) записана для движения по горизонтальной поверхности или при движении на подъем.

Сила сопротивления при движении на подъем $F_c = G_a \cos \alpha$.

На рис. 5 показан случай, когда автомобиль движется по горизонтальной поверхности, а затем переходит на наклонный участок; силу F_c можно приближенно задать в виде некоторой функции.

Представим суммарный момент сопротивления на колесах следующим образом:

$$M_{\Sigma K} = M_{01} + \Delta M_{12} \sin 2\pi f t, \quad (5)$$

$$M_{\Sigma K} = M_{01} + \Delta M_{12} \text{ при } t \geq t_0, \quad (6)$$

где M_{01} — суммарный момент сопротивления качению; ΔM_{12} — дополнительный момент для случая движения автомобиля на подъем, $\Delta M_{12} = G_a \sin \alpha \cdot r$ (t_0 — время от начала въезда переднего колеса до въезда на подъем заднего колеса); $f' = \frac{1}{4t_0}$ — задаваемая частота.

В дальнейшем при моделировании процессов решение проводилось в два этапа.

На первом этапе вначале определяли напряжения U_{01} и U_{02} для стационарных режимов при движении автомобиля с выбранной скоростью по горизонтальной плоскости или на подъем с заданным значением угла подъема α . На втором — решали систему уравнений для случая, когда автомобиль, двигаясь по горизонтальному участку, затем продолжает движение на подъем. При этом момент сопротивления изменяется в соответствии с уравнениями (5) и (6), а закон изменения напряжения имеет вид

$$U(t) = U_{01} + \Delta U_{12} \sin 2\pi f t \text{ при } t < t_0,$$

$$U(t) = U_{02} \text{ при } t > t_0.$$

Если на этот закон изменения напряжения $U(t)$ наложить составляющую более высокой частоты f , закон принимает вид

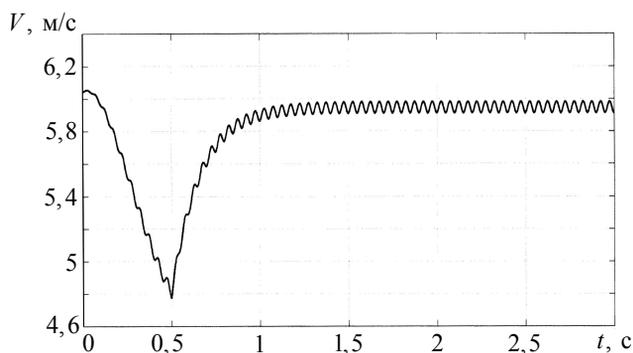
$$U(t) = U_{01} + \Delta U_{12} \sin 2\pi f t + \beta \sin 2\pi f t \sin 2\pi f t \quad \text{при } t < t_0,$$

$$U(t) = U_{02} + \beta \Delta U_{12} \sin 2\pi f t \quad \text{при } t \geq t_0,$$

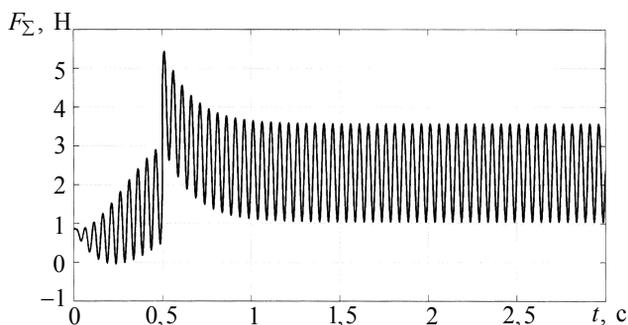
где f — частота, принимающая дискретные значения (5, 10, 15, 20, 25, 30 Гц); β — коэффициент, принимающий значения от 0 до 1.

В дальнейшем полученные законы управления используются при экспериментальных исследованиях поведения физической модели автомобиля.

В соответствии со схемой (см. рис. 5) разработана конструкция, которая позволяет изменять угол подъема и производить оценку поведения физической модели на поверхности льда при различных законах управления крутящими моментами.



а



б

Рис. 6. Изменение суммарной скорости автомобиля V (а) и суммарной подводимой тяговой силы F_{Σ} (б) при въезде автомобиля на подъем в случае импульсного управления движением ($\beta = 1$; $f = 20$ Гц; $\alpha = 8^\circ$)

Предварительные тестовые испытания модели позволили уточнить некоторые электрические параметры и скорректировать выбранную методику.

В дальнейшем планируется провести серию сравнительных испытаний для различных углов подъема и при варьировании некоторых параметров физической модели автомобиля.

Общие результаты и выводы по работе:

1. Проведены экспериментальные исследования пары трения эластомер – лед в широком диапазоне нормальных нагрузок и скоростей скольжения в стационарном и нестационарном режимах.

2. Экспериментальные исследования в стационарных режимах на льду показали, что коэффициент трения уменьшается при увеличении номинального давления и скорости скольжения в контакте.

3. Проведенные исследования нестационарных режимов при различной интенсивности возрастания тангенциальной силы в контакте и качественно и количественно совпадают с результатами, полученными другими авторами [2, 4, 5] при экспериментальных исследованиях, выполненных для случаев взаимодействия автомобильного колеса с различными поверхностями.

4. Проведенные исследования на установке УТУ-3 на льду позволили обобщить ранее известные результаты для широкого диапазона скорости приложения тангенциальной нагрузки.

5. Испытания на установке УТУ-3 на льду подтвердили влияние времени пребывания точки в контакте под действием давления до начала приложения тангенциальной нагрузки на реализуемую реакцию в контакте (эффект «примерзания»).

6. Проведенное математическое моделирование модели автомобиля с электромеханической трансмиссией и тестовые испытания модели подтвердили целесообразность испытаний физической модели автомобиля и заложили основу для разработки алгоритмов управления в широком диапазоне внешних условий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Person B.N.J. Theory of rubber friction: nonstationary sliding. *JUWELL FZ-JVELICH.DE*; Julich, 2002. URL: <http://juwel.fzjuelich.de:808/dspace/bitstream/2128/1343/1/17249.pdf> (дата обращения 01.10.2011).
- [2] Ivnowic V. Experimental identification of dynamic tire friction potential on the surfaces. *FSB. HR*; Zagreb, 2005. URL: http://www.fsn.hr/NewsUpload/31_10_2172_awarded_paper_IVASD-1stpage.pdf (дата обращения 01.10.2011).
- [3] Ларин В.В. *Теория движения полноприводных колесных машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, 391 с.
- [4] Айнбиндер С.Б., Тюнина Э.Л. *Введение в теорию трения полимеров*. Рига, Зинатне, 1978, 123 с.
- [5] Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В. *Трение и износ полимеров*. Ленинград, Химия, 1972, 240 с.
- [6] Moore D.F. *The friction and lubrication of elastomers*. Oxford, 1975, 228 p.
- [7] Котиев Г.О., Горелов В.А., Мирошниченко А.В. Синтез системы управления тяговыми электродвигателями для индивидуального привода ведущих колес автомобиля [Электронный ресурс] *Наука и образование*,

2011, вып. 12, № 77-30569/282533. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/282533.html>

- [8] Котиев Г.О., Горелов В.А., Мирошниченко А.В. Алгоритм управления индивидуальным приводом колесных движителей транспортных средств. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, спец. вып. Энергетическое и транспортное машиностроение, с. 39–58.
- [9] Котиев Г.О., Горелов В.А., Мирошниченко А.В. Разработка закона управления индивидуальным приводом движителей многоосной колесной машины. *Известия вузов. Машиностроение*, 2012, № 1, с. 49–59.
- [10] Котиев Г.О., Горелов В.А., Мирошниченко А.В. Математическая модель электромеханического тормозного управления колесной машины. *Журнал ассоциации автомобильных инженеров*, 2012, № 2, с. 38–42.
- [11] Белоусов Б.Н., Шухман С.Б. *Прикладная механика наземных тягово-транспортных средств с мехатронными системами*. Москва, Агроконсалт, 2013, 610 с.

Статья поступила в редакцию 28.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Купреянов А.А. Исследование динамического потенциала шины на поверхностях, покрытых слоем льда. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/1125.html>

Купреянов Андрей Анатольевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ по проектированию колесных машин. Область научных интересов: проектирование и расчет трансмиссий колесных транспортных средств. e-mail: VIAnkup@yandex.ru