

УДК 629.3

Экспериментальное определение характеристик пары трения: «эластомер – ледяная опорная поверхность» в стационарных и переходных режимах

Румянцев Е.О., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Колесные машины»*

Мыльников В.В., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Колесные машины»*

Научный руководитель: Купреянов А.А., к.т.н., доцент

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

kafsm10@sm.bmstu.ru

Для корректной оценки характеристик колесного движителя в составе колесной машины и возможности прогнозирования тягово-сцепных и тормозных свойств автомобиля, в том числе при наличии антиблокировочных (АБС) и антипробуксовочных (АПС) систем необходимо применять комплексную математическую модель колеса. Эта модель должна учитывать механические свойства упругой оболочки термодинамическую модель тепловых процессов в шине, а также трибологические характеристики контакта шины с дорогой.

В ряде теоретических и экспериментальных работ показано, что характер φ_x -диаграммы при значениях скольжения S больше $S_{кр}$, в основном определяется трибологическими характеристиками контакта, где

$$\varphi_x = \frac{R_x}{R_z} \quad (1)$$

В формуле (1)

R_x – продольная реакция в контакте;

R_z – нормальная реакция.

$$S = \frac{V - \omega r_{\kappa}^*}{V}, \quad (2)$$

V – продольная скорость оси колеса,

ω – угловая скорость обода,

r_k^* – расчетный радиус колеса, причем

$$r_k^* \approx \frac{r_d + r_k^c}{2} \quad (3)$$

r_d – динамический радиус,

r_k^c – радиус качения в свободном режиме,

$S_{кр}$ – критическое скольжение (максимальное значение величины скольжения на диаграмме $\varphi_x = f(S_x)$).

Для получения параметров комплексной математической модели колеса необходимо сначала рассчитать параметры механической части модели (упругой оболочки)[1].

Для этого требуется промоделировать некоторые стационарные режимы качения и статического нагружения колеса, и сравнить с результатами экспериментальных исследований шины на стенде.

Для получения трибологических характеристик контакта шины с твердой опорной поверхностью были проведены экспериментальные исследования на триботехнической установке вращательного типа УТУ-3.

На установке можно исследовать трение и износ. Установка работает по схеме: «палец – диск». Исследовалось трение пары: «эластомер – ледяная поверхность».

В качестве эластомера испытывалась протекторная резина автомобильных шин. Ледяная поверхность получалась путем замораживания воды в специальном цилиндре, устанавливаемом на установку.

Ниже приводится методика определения трибологических характеристик в контакте шины с дорогой на триботехнической установке УТУ-3.

Триботехническая установка вращательного типа УТУ-3

На рис. 1 представлен общий вид установки УТУ-3.

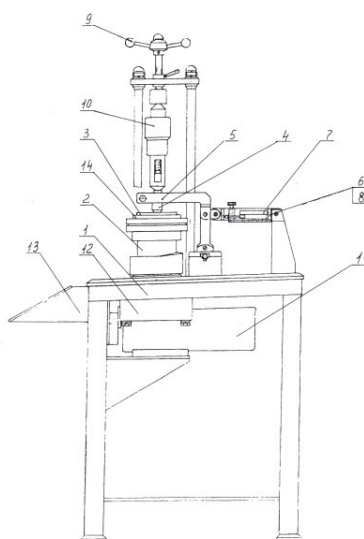


Рис. 1. Схема установки УТУ-3

В состав установки входят (Рис. 1): станина (поз. 1), вращающийся рабочий стол (поз. 2), на котором крепится нижний подвижной образец (поз. 3). К торцевой поверхности нижнего образца прижат верхний образец (поз. 4), который крепится в двуплечем рычаге (поз. 5), связанным с тензоизмерительным элементом (поз. 6).

На грани этого элемента наклеены тензорезисторы (поз. 8). Внутри тензоэлемента может быть установлен индикатор (поз. 7). Прижатие образцов осуществляется рукояткой (поз. 9). Усилие прижатия определяется по шкале нагружающего устройства (поз. 10).

Вращение рабочего стола с нижним образцом осуществляется с помощью электродвигателя (поз. 11) через редуктор (поз. 12).

Регулирование частоты вращения рабочего стола производится с помощью ручек на лицевой панели блока управления (поз. 13).

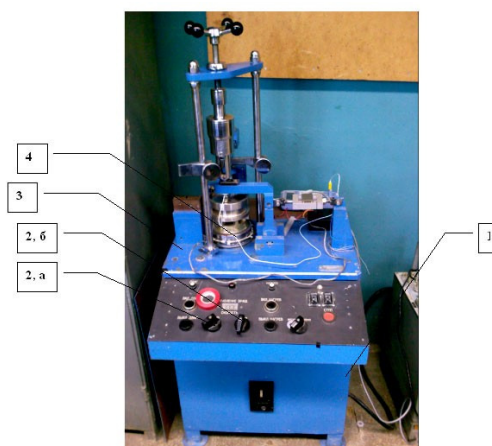


Рис. 2. Общий вид триботехнической установки

Установка УТУ-3 состоит из электромеханической части и измерительного комплекса.

В состав электромеханической части входит:

- массивная станина (поз.1 рис. 2);
- асинхронный электродвигатель;
- преобразователь частоты асинхронного двигателя с выводом на регулируемые потенциометры грубой регулировки (поз. 2а рис. 2) и точной настройки скорости вращения (поз. 2б рис. 2);
- червячный редуктор.

На выходе расположенного вертикально вала червячного колеса, проходящего через отверстие в плате станины установлен вращающийся цилиндр (поз. 4 рис. 2).

На вращающийся цилиндр устанавливаются различные диски с встроенными образцами опорной поверхности (асфальт, бетон, лед и т.д.).

К поверхности диска прижимается держатель (поз. 2 рис. 3) с различными образцами.



Рис. 3. Испытуемые образцы

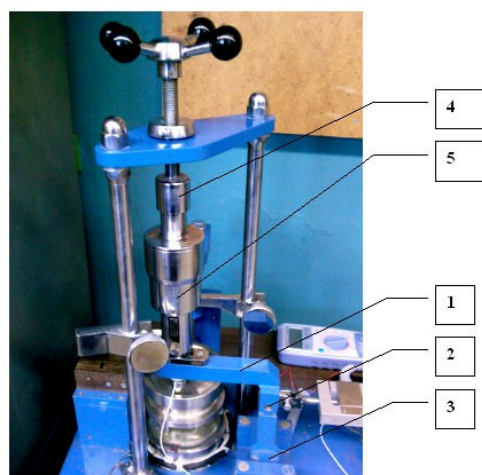


Рис. 4. Нагружающее устройство

Держатель образцов установлен на двухрычажной направляющей (поз. 1 рис. 4) с шарнирами (поз. 2 рис. 4), позволяющей держателю перемещаться только в вертикальном направлении и по касательной к беговой дорожке диска.

Выводы датчика скорости вращения и тензоэлемента также идут на распределительный прибор. Здесь на соответствующие контакты подается питание для датчиков, а выходные сигналы передаются на усилитель ZET 410 и далее на соответствующие входные каналы АЦП ZET 210.

Модуль АЦП ZET 210 подключается к персональному компьютеру, где все выходные сигналы могут быть записаны и обработаны в соответствии с программой испытаний.

Были проведены экспериментальные исследования пары «эластомер – ледяная поверхность» в широком диапазоне изменения нагрузки (номинального давления), скорости скольжения и температуры.

Исследование трибологических характеристик пары трения: «эластомер – лед» на установке УТУ-3

Исследование пары трения: «эластомер – лед» представляет большой практический интерес, так как это напрямую связано с задачей реализации сил трения (и сцепления) в контакте шины с дорогой в зимних условиях.

Как известно, зимой и ранней весной происходит наибольшее количество аварий автомобилей на дорогах. Это связано с низким значением коэффициента трения (и сцепления) на льду.

Кроме того характеристики поверхности льда очень сильно меняются в зависимости от температуры, влажности, структуры льда, последовательности изменения температуры в процессе образования льда и т.д.

Из-за этих причин очень сложно построить эффективный алгоритм функционирования АБС.

Все эти причины порождают значительное увеличение тормозного пути, потерю курсовой устойчивости занос автомобиля и приводят к многочисленным авариям на дорогах.

Большую роль в снижении трения автомобильных шин на льду играет образование тонкой водяной пленки на поверхности льда, вероятность образования которой резко увеличивается ранней весной, когда температура воздуха ночью может быть существенно меньше нуля, а утром и днем – больше нуля.

По мнению многих исследователей и испытателей зачастую зимние шины с «отсосом» воды из зоны контакта (например, фирмы Бриджстоун) 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 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 льду (Установка UG для качественного определения сил сцепляемости в зимних условиях, установка фирмы SAAB для оценки сил трения для обеспечения безопасности посадки самолета на поверхность взлетной полосы, установка CIV – испытательно-измерительная установка, лаборатория армии США по проектированию и исследованию холодных регионов.

Целью данной работы является изучение трибологических характеристик пары «эластомер – лед при комнатной температуре».

Предварительно вода замораживается в полости нижнего подвижного образца, который помещается в морозильную камеру.

Для проведения измерений нижний подвижный образец крепится к вращающемуся рабочему столу.

На рис. 5 установка показана в собранном виде для испытания пары: «эластомер – лед».



Рис. 5. Установка УТУ-3 с установленным образцом ледяной поверхности

Далее в стационарных условиях производится запись процессов изменения параметров (силы трения, температуры и частоты вращения диска).

Измерения производятся для ряда дискретных значений нормальной нагрузки N_i (и номинального давления p_{a_i}) и частоты вращения рабочего стола n_i .

Кроме испытаний в стационарных условиях были приведены специальные испытания при изменении темпа нарастания подводимого момента (и реализуемой силы трения в контакте).

В научной литературе имеются данные, которые показывают, что с ростом скорости нарастания подводимого к колесному движителю крутящего момента растет величина реализуемой реакции в контакте.

Как видно из рис. 6 с ростом темпа нарастания крутящего момента подводимого к колесе почти в три раза возрастает реализуемая в контакте продольная реакция (F_{mp}).

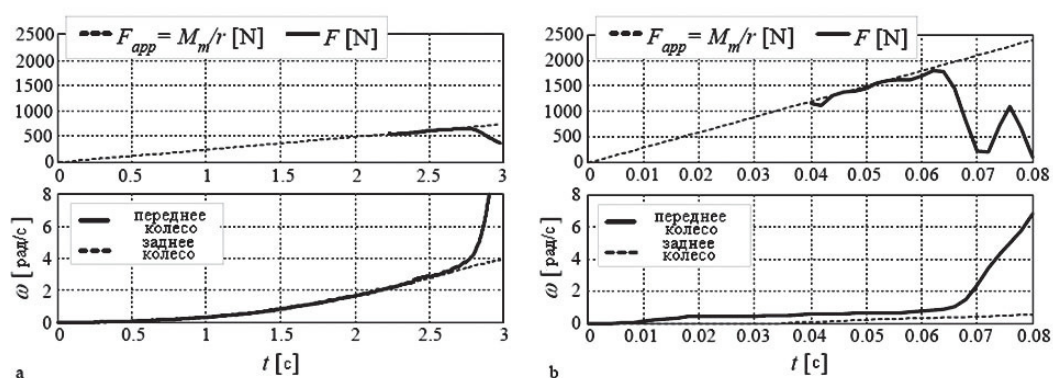


Рис. 6. Влияние скорости нарастания подводимого к колесу крутящего момента на реализацию сцепления

Испытания на установке УТУ-3 проводят к аналогичному результату.

На рис. 7 приведены данные зависимости максимальной реализуемой силы трения в контакте пары: «эластомер – лед» в зависимости от $\log V_F$, где V_F – скорость нарастания силы трения в контакте, Н/с. при значениях нормальной нагрузки $N=22,5$ Н, $N=35$ Н и $N=60$ Н, что соответствует значением номинального давления p .

$$p_a=0,286\text{МПа}; p_a=0,446\text{МПа и } p_a=0,764\text{МПа.}$$

Как видно из рис. 7 для каждого значения нормальной нагрузки N реализуемая продольная реакция F существенно зависит от скорости нарастания силы трения в контакте.

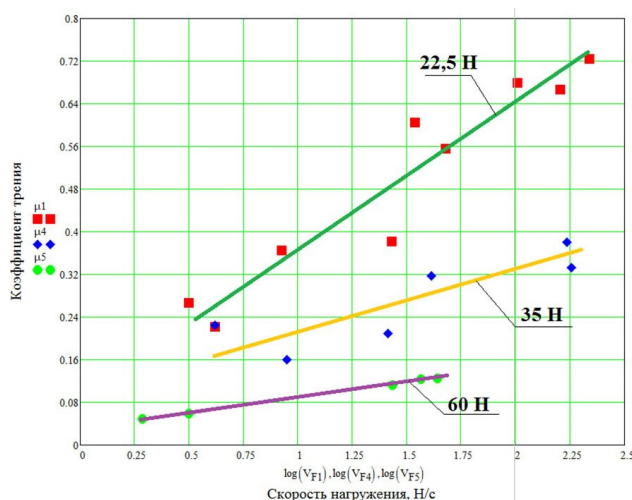


Рис. 7. Результаты экспериментальных исследований пары: «эластомер – лед» при изменении скорости нагружения

На рис. 8-9 изображен процесс реализации силы трения при различном темпе нарастания внешней тяговой силы.

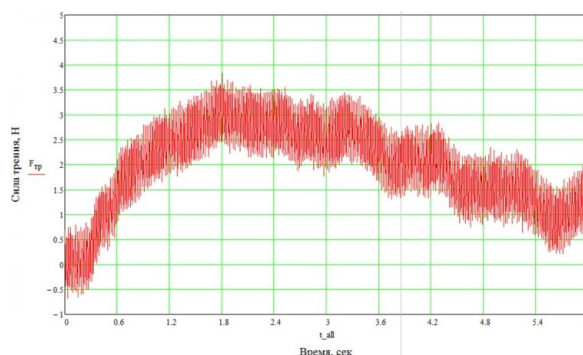


Рис. 8. Изменение силы трения $F_{тр}$ для пары: «эластомер – лед» при плавном нагружении

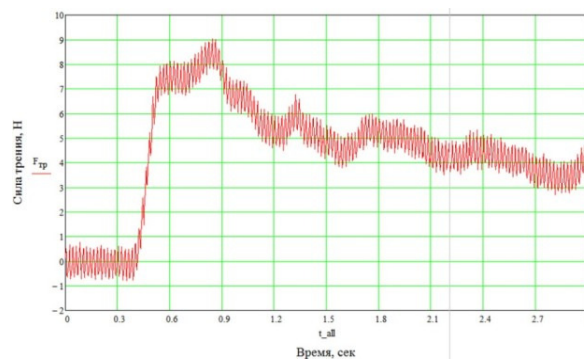


Рис. 9. Изменение силы трения $F_{тр}$ при резком возрастании нагрузки на льду (выдержка по времени после приложения нормальной нагрузки ($N=60H$)).

На рис. 9-11 приведены результаты экспериментов при одинаковой скорости нарастания силы трения при различной выдержке после приложения нормальной нагрузки.

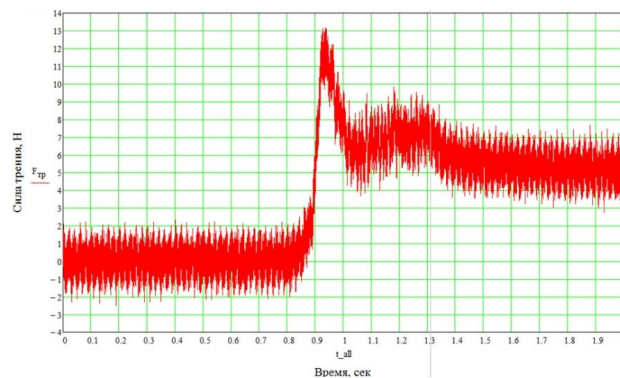


Рис. 10. Изменение силы трения $F_{тр}$ при резком возрастании нагрузки на льду (выдержка – 30 секунд)

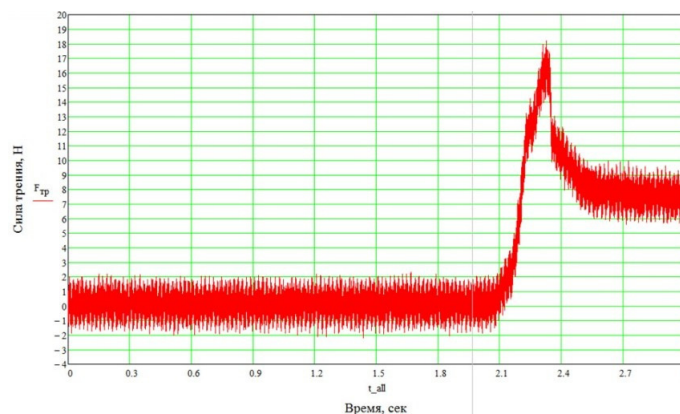


Рис. 11. Изменение силы трения $F_{тр}$ при резком возрастании нагрузки на льду (выдержка 60 секунд)

Однако данное исследование не ограничивается только выполнением опытов на стенде УТУ-3. Конечно, стенд позволяет увидеть особенности взаимодействия эластомер – твердая опорная поверхность, но неотъемлемой частью данной работы считаю проведение опытов на масштабной модели колесной машины.

В нашем случае была выбрана модель колесной машины, выполненная в масштабе 1/16 – Traxxas E-Revo. Данная модель является полноприводной (4x4) (рис. 12). Движение осуществляется за счет электромотора коллекторного типа, который через зубчатые зацепления и карданные валы передает момент на колеса.



Рис. 12. Модель Traxxas E-Revo 1/16

Для исследования требуется некоторая доработка модели, а точнее – создание возможности управления подводимым к колесам моментом. Как было показано, реализуемый коэффициент трения сильно зависит от скорости нагружения. Было выдвинуто предположение о том, что при задании закона подачи момента на колеса автомобиля (рис. 13) возможно реализовать больший момент.

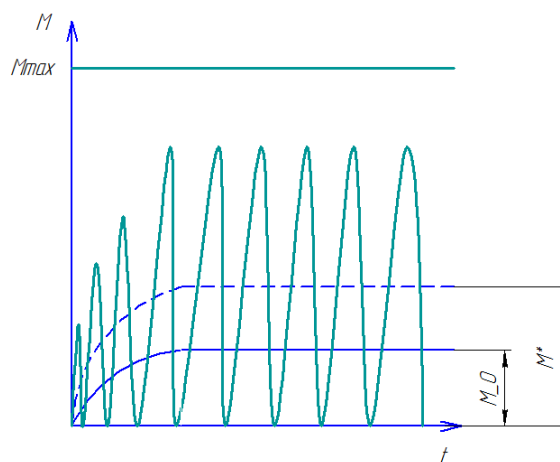


Рис. 13. Закон управления моментом

Концепция исследования на данной модели состоит в том, что мы, согласно рис. 13, прикладываем импульсно момент, не достигая максимального момента по сцеплению, чтобы не происходило разрушения контакта и срыва колес. M_0 – это максимальное значение момента в случае плавного приложения. M^* – это математическое ожидание результирующего момента в случае импульсного его приложения. Из графика видно, что $M^* > M_0$. Закон импульсного приложения момента выглядит так: $M = M^* \sin \omega t$.

На данном этапе были выполнены более простые опыты – без применения закона изменения момента (рис. 14). Было исследовано поведение данной модели на плоской ледяной поверхности и на наклонной ледяной поверхности. Для сравнения результатов так проведена серия опытов не просто на льду, а на более грубой зимней поверхности – наст.



Рис. 14. Исследование взаимодействия модели колесной машины и льда

Для исследования использовались шины разного типа и размеров, что позволило получить сравнительные данные.

<http://sntbul.bmstu.ru/doc/623276.html>

Результаты и выводы

1. Проведены экспериментальные исследования на лабораторной установке УТУ-3 пары трения «эластомер – ледяная опорная поверхность»
2. В результате взаимодействия эластомера со льдом в пятне контакта может быть реализована реакция, в несколько раз превышающая максимальную реакцию при статическом нагружении. Объясняется это явление тем, что до разрушения контакта эластомера со льдом начинает образовываться тонкая водяная пленка через которую кратковременно можно передать силу, которая при статическом нагружении приводит к постепенному разрушению связи и началу скольжения.
3. В зависимости от выдержки после приложения нормальной силы на льду от отсутствия выдержки до одной минуты реализуемая сила трения возрастает почти в три раза.
4. С ростом скорости скольжения на льду от 0,025м/с до 0,25м/с сила трения уменьшается почти в три раза.
5. Может быть реализован адаптивный алгоритм при качении колеса по льду использующий импульсное нагружение с выбранными амплитудой и частотой, который позволит существенно улучшить тягово-сцепные возможности колеса.

Список литературы

1. Купреянов А.А., Морозов М.В. Разработка методов управления режимом работы колесного движителя, повышающих его тягово-сцепные свойства в составе колесной машины // Трибология и надежность: Сб. тр. XI межд. конф. под ред. К.Н.Войнова. – СПб., 2011. – С. 181-190.
2. Persson B.N.J. Theory of rubber friction and contact mechanics [электронный ресурс]: Julich, 2001, URL: [http://www.multcaleconsulting.com/presources/Theory + of + rubber + friction + and + contact + mechanics.pdf](http://www.multcaleconsulting.com/presources/Theory%20of%20rubber%20friction%20and%20contact%20mechanics.pdf) (дата обращения: 01.11.2010).
3. Мур Д. Основы и применения трибоники. /Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 487 с.
4. Experimental identification of dynamic tire friction potential on ice surfaces /V. Ivanoviwic [et al] // FSB. HR: Zagreb, 2005. URL. [http://www.fsb.hr/NewsUpload/31_10_2005_4172_ awarded_ paper_ IAVSD_1stpage.pdf](http://www.fsb.hr/NewsUpload/31_10_2005_4172_awarded_paper_IAVSD_1stpage.pdf) (дата обращения: 01.11.2010).