

# РОЛЬ ТРЕНИЯ ПРИ ХОДЬБЕ

Человек ходит, совершенно не думая, как он это делает. Он уверенно чувствует себя на сухой дороге, на деревянном или бетонном полу, на асфальте. И уж подавно он не задумывается о том, какие силы действуют на него при ходьбе. И только на льду или на скользком полу человек вдруг теряет опору и начинает выбирать место, куда поставить ногу. Что же произошло? Оказывается, исчезла (точнее — сильно уменьшилась) одна из действующих сил — сила трения.

Доктор технических наук В. БАЛАКИН (г. Гомель).

Трением сопровождается любое движение. В большинстве случаев трение приводит к износу машин и механизмов, вынуждая бороться с ним всеми доступными способами. Однако далеко не всегда оно оказывается вредным. Более того: передвижение по земной поверхности в отсутствие сил трения было бы вообще невозможно. Именно трение между вращающимся колесом и дорогой дает возможность поездам и автомобилям двигаться, а трение между подошвой и землей — позволяет человеку ходить.

Сила трения зависит от состояния трущихся поверхностей и пропорциональна нагрузке, направленной перпендикулярно опоре (в физике такую нагрузку принято называть нормальной). Величину пропорциональности называют коэффициентом трения. При одном и том же весе человека, то есть при одной и той же нормальной нагрузке, сцепление стертой кожаной подошвы с асфальтом будет слабее, чем подошвы из пористой резины. Значит, во втором случае сила трения больше и вместе с ней — коэффициент трения. При ходьбе по асфальту в обуви на мягкой резиновой подошве коэффициент трения составляет примерно 0,5. Это означает, что человека весом, скажем, 500 ньютонов (то есть массой около 50 килограммов) можно сдвинуть с места горизонтальной силой 250 ньютонов. В гололед коэффициент трения может уменьшиться раз в 25, достигая величины 0,02.

Каждый, вероятно, может припомнить случай, когда на скользком месте при попытке сделать очередной шаг вынесенная вперед нога неожиданно скользит вперед, а

человек начинает падать назад или вбок. Чтобы понять, почему это происходит, рассмотрим с точки зрения механики в деталях, как производится отдельный шаг.

Человек наклоняется и почти одновременно приподнимает одну ногу, перемещая вперед центр своей массы. Возникающий при этом момент сил тяжести (веса) его тела относительно точки опоры — точки соприкосновения оставшейся сзади ноги с землей — вызывает как бы падение человека вперед. Успев в начальной стадии этого падения пяткой «передней» ноги коснуться земли, человек выполняет шаг. Пятка воспринимает составляющую силы тяжести, направленную вдоль вытянутой ноги. Эта составляющая, в свою очередь, раскладывается на две: перпендикулярную к поверхности, по которой вы идете (нормальную), и параллельную этой поверхности (тангенциальную). Нормальная составляющая, умноженная на коэффициент трения, как раз и создает силу трения между ногой и поверхностью. Тангенциальная составляющая стремится сдвинуть ногу вперед, а сделать это ей мешает сила трения.

Чем длиннее шаг делает человек, тем сильнее он наклоняется вперед. С ростом угла наклона туловища перпендикулярная земле составляющая его веса уменьшается, а параллельная увеличивается. Соответственно уменьшается сила трения, и увеличивается сила, сдвигающая ногу вперед. При некоторой ширине шага эта сдвигающая сила может превысить силу трения: нога проскользнет вперед, а туловище человека нач-

● ФИЗ ПРАКТИКУМ



◀ **Кинограмма бегущего человека, снятая французским исследователем Этьенном Жюлем Мареем в конце 80-х годов прошлого века. Человек, одетый в черный костюм, двигался на черном фоне. След на фотопластинке оставили только нашитые на его одежде полоски белой ткани.**

нет опрокидываться назад. Это же происходит, когда носок оставшейся сзади ноги начинает скользить назад опять-таки из-за того, что сила трения уже не может противодействовать параллельной (сдвигающей) силе.

Проскальзывание каблука в зоне контакта с опорой, то есть скольжение, как и всякое трение, приводит к выделению тепла, нагреву подошвы обуви и поверхности опоры. Этого тепла достаточно, чтобы в гололед началось оплавление ледяной поверхности, резко уменьшающее и без того малый коэффициент трения (см. «Наука и жизнь», № 3, 1982 г.). Если поверхность льда прикрыта снегом, нагрузка передается на лед через прослойку снежинок — кристалликов замерзшей воды с относительно большой суммарной поверхностью. Кристаллы снега обычно насыщены влагой (см. «Наука и жизнь» № 1, 1994 г.), которую выжимает из снега давление каблука. На спрессованной массе снежинок появляется пленка воды, играющая роль смазки. Как и в предыдущем случае, трение из сухого превращается в жидкое, при этом уменьшается в десятки раз. Возникает опасность падения.

Любители зимней рыбалки хорошо знают, что наиболее «скользким» лед бывает при плюсовой температуре воздуха, особенно когда его поверхность покрыта порошей или пленкой воды. Расчеты подтверждают, что ходить по такому льду следует мелкими шажками. Более того — они показывают, что длина шага зависит от роста человека и должна быть не более 27 сантиметров при росте 1,5 метра и не более 33 сантиметров — при росте около 2 метров. В таблице каждый может отыскать предельную длину своего шага при передвижении в самых разных условиях.

Очень опасны в гололед участки дороги, имеющие небольшой, порой незаметный для глаза, уклон, и особенно бугристая дорога. Такой нередко становится поверхность городских тротуаров зимой: она наклонена в сторону проезжей части для стока воды и после снегопада покрывается лепешками спрессованного снега. В оттепель, при углах наклона дороги или склона ледяного бугорка 1,5 — 2 градуса, уже возникает опасность падения.

Из всего сказанного можно сделать еще один вывод: обувь для скользкой дороги должна иметь мягкую ровную подошву и желательнее из пористого материала, впитывающую выжатую влагу, без каблука (чтобы увеличить площадь опоры). Если же на скользкую подошву наклеить кусок влагостойкой наждачной бумаги на матерчатой основе, сила трения возрастет в десятки раз и нога скользить не будет вообще.

## ● ПОДРОБНОСТИ ДЛЯ ЛЮБОЗНАТЕЛЬНЫХ

Во время прогулки по зимней дороге или по льду замерзшего водоема можно измерить величину коэффициента трения между подошвой обуви и поверхностью. Для этого понадобится метровая рулетка и таблицы тригонометрических функций. Таблицы можно оставить дома, а рулетку придется захватить с собой.

Пойдем по выбранному для измерений участку дороги, увеличивая шаги. В какой-то момент выдвинутая вперед нога начнет скользить. Измерим длину шага  $L$ , при котором началось скольжение — расстояние между носками (или пятками) обеих ног. Вычтем из длины шага  $L$  длину подошвы  $l_n$  (если известен размер обуви в метрической системе, можно взять просто номер обуви: он соответствует дли-

## ИЗМЕРИМ КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ

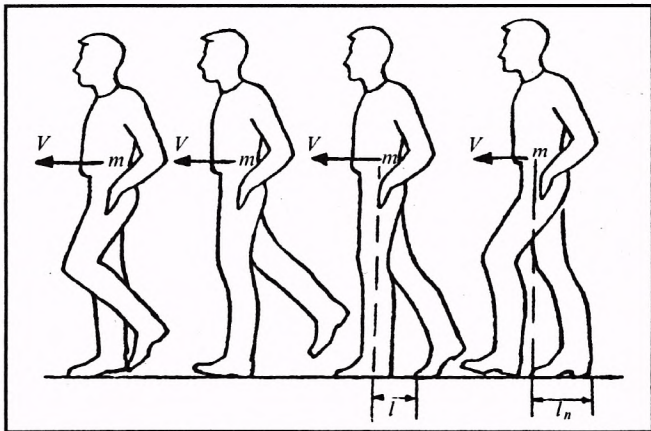
не стопы в сантиметрах). Очевидно, что  $l \approx L - l_n$ .

Измерим длину ноги  $l_n$  от поверхности почвы до тазобедренного сустава. Теперь можно рассчитать величину угла между направлением силы тяжести (веса) и ее составляющей, направлен-

ной вдоль ноги. Она найдется из формулы

$$\sin \alpha = \frac{l/2}{l_n}$$

$$\alpha = \arcsin \frac{l/2}{l_n}$$



Отдельные фазы шага человека.



## ЗАВИСИМОСТЬ ПРЕДЕЛЬНОЙ ДЛИНЫ ШАГА ЧЕЛОВЕКА $l$ (M) ОТ ПРИРОДЫ И СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОПОРЫ

Опора	Коэффициент трения $f$	Угол наклона туловища $\alpha$	Рост человека $H$ , м					
			1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Гладкий лед, покрытый слоем снега	0,020	1°10'	0,27	0,28	0,29	0,31	0,32	0,33
	0,025	1°25'	0,28	0,29	0,30	0,32	0,33	0,34
	0,030	1°40'	0,29	0,30	0,31	0,33	0,34	0,35
Гладкий лед, покрытый пленкой воды во время дождя	0,035	2°00'	0,30	0,31	0,32	0,34	0,35	0,36
	0,040	2°20'	0,31	0,32	0,33	0,35	0,36	0,37
Гладкий лед при температуре воздуха около 0°C	0,100	5°40'	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,49
Гладкий мокрый пол	0,100	5°40'	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,49
Гладкий лед при температуре воздуха -5°C	0,150	8°40'	0,44	0,49	0,52	0,54	0,57	0,59
Грязная дорога (после дождя, оттепели)	0,150	8°40'	0,44	0,49	0,52	0,54	0,57	0,59
Сухой гладкий пол	0,250	14°00'	0,61	0,64	0,67	0,71	0,75	0,79
Сухая дорога	0,300	16°40'	0,69	0,73	0,77	0,81	0,85	0,89
Сухой асфальт	0,400	21°50'	0,80	0,85	0,89	0,95	0,99	1,04

Величину угла по значению его синуса находим по таблице.

Сила трения равна силе нормального давления, умноженной на коэффициент:  $f = TN$ . Отсюда

$$f = \frac{T}{N}$$

Из подобия треугольников, образованных составляющими сил и геометрией шага, следует, что

$$f = \operatorname{tg} \alpha$$

Полученная величина коэффициента трения зависит не только от состояния поверхности и температуры воздуха, но и от вида обуви. Проведя серию измерений при разной погоде и на разных участках дороги, можно «по науке» подобрать обувь для любых погодных условий.

### КАКАЯ НОГА СКОЛЬЗИТ?

При анализе движения человека по скользкой поверхности может возникнуть вопрос: почему при ходьбе по льду начинает скользить «передняя» нога вперед, а не «задняя» назад?

### Динамика голеностопного звена.

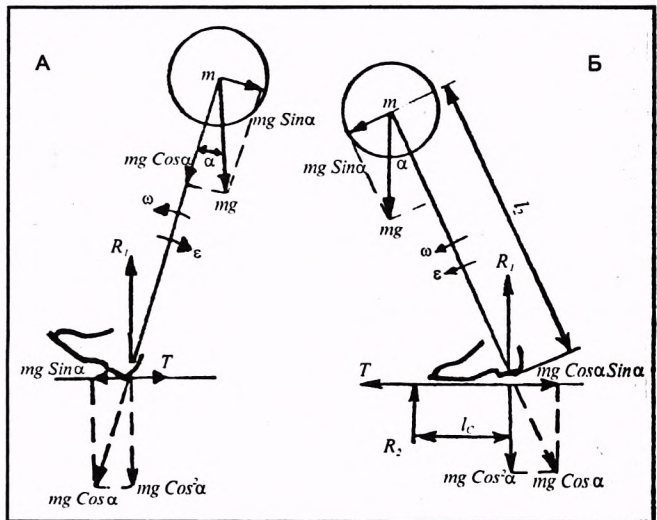
$l$  — длина голени,  $l_c$  — длина стопы,  $T$  — сила трения,  $R_1$  — реакция опоры на уровне пятки,  $R_2$  — реакция опоры на уровне носка,  $\omega$  — угловая скорость,  $\varepsilon$  — угловое ускорение.

Чтобы ответить на этот вопрос, исследуем динамику движения человека. Для простоты расчетов рассмотрим только его голеностопный сустав, считая, что вся масса тела человека опирается на верхнюю часть голени (рисунок внизу). Во время шага масса поворачивается в пределах некоторого угла с переменной угловой скоростью  $\omega$ . Угловое ускорение  $\varepsilon$  направлено в сторону скорости  $\omega$ , а момент силы инерции  $M_v = \varepsilon J$ , где  $J$  — момент инерции системы, — в сторону, противоположную угловому ускорению.

Проанализируем начальную фазу шага (А).

Силу тяжести разложим на две составляющие: вдоль голени —  $mg \sin \alpha$  и в перпендикулярном направлении —  $mg \cos \alpha$ . Первую составляющую переносим по линии действия и прикладываем к точке опоры — к пятке. Ее, в свою очередь, раскладываем на нормальную к поверхности трения составляющую  $-R_1 = mg \cos^2 \alpha$  и тангенциальную составляющую  $F = mg \sin \alpha \cos \alpha = mg \sin \frac{2\alpha}{2}$ .

Ступня человека может поворачиваться в суставе на некоторый угол, взаимодействуя с голенью через упру-





## ИГРОКИ

### СТАРИННАЯ ЗАДАЧА

Трое играли на бильярде с условием, что после каждой партии проигравший уплачивает двум другим игрокам столько денег, сколько у каждого из выигравших уже имеется. Все игроки проиграли по одной партии, и у них оказалось по 48 рублей. Сколько денег было у каждого в начале игры?

гую связь. Через эту связь ступня воспринимает момент сил  $M = mg \sin \frac{l_2}{l_c} - J$

относительно пятки. Ее реакция на этот момент

$$R_2 = mg \sin \frac{l_2}{l_c} - J,$$

где  $l_r$  — длина голени,  $l_c$  — длина ступни от пятки до основания пальцев ноги.

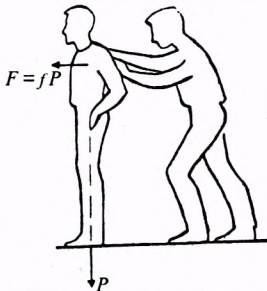
Нормальная нагрузка на лед со стороны подошвы в этом случае выразится суммой  $R = R_1 + R_2$ .

Рассмотрим теперь конечную фазу шага (Б). В этом положении тела реакция опоры  $R^2 = fmg \cos^2 \alpha$  (где  $f$  — коэффициент трения) меньше суммарной реакции  $R$  опоры, соответствующей начальной фазе шага.

Кроме того, площадь контакта между каблуком и дорогой в конечной фазе — наименьшая за все время шага. Это и приводит к резкому уменьшению силы трения в начале последней фазы шага, скольжению «передней» ноги вперед и падению человека назад.

Вспомним теперь, как ведет себя поскользнувшийся человек. Стараясь восстановить утраченное равновесие, он чисто рефлекторно взмывает руками и выгибается вперед, естественно, не задумываясь о физическом смысле своих движений. А он достаточно очевиден: прогнувшись, человек смещает центр масс в сторону, противоположную падению, а при взмахе рук, согласно закону сохранения импульса, сообщает туловищу направленную в ту же сторону

Контакт подошвы с наклонной поверхностью. В — вид сбоку, Г — вид спереди.  $\beta$  — угол наклона поверхности,  $T$  — сила трения,  $R$  — реакция опоры.



Сила трения  $T$  равна силе нормального давления (в данном случае — весу человека  $P = mg$ ), умноженная на коэффициент трения  $f$ . На сухом асфальте величина коэффициента трения  $f = 0,5$ . Это значит, что сдвинуть человека с места можно, приложив горизонтальную силу  $F = T = fP = 0,5mg$ . На скользкой поверхности эта сила уменьшится в десятки раз.

ну скорость. Это помогает если и не предотвратить падение, то по крайней мере замедлить его и приготовиться к удару о землю. Похожие движения делает упавшая кошка, чтобы встать на землю лапами.

Нога скользить не будет, если выполняется условие

$$fmg \cos^2 \alpha \geq mg \cos \alpha.$$

Бывают, однако, случаи, когда еще до начала контакта каблука «передней» ноги с землей «задняя» нога отскользывает назад. Это происходит, когда человек делает слишком длинный шаг, переноса вес вперед, или когда под носком «задней» ноги оказывается особо скользкий участок, вроде полоски влажного льда. И то, и другое резко уменьшает силу трения.

### НЕ ХОДИ ПО КОСОГОРУ...

При движении по поверхности, имеющей небольшой, порой незаметный для глаза, наклон, особенно часто возникает опасность падения (рисунок внизу). На участке, наклоненном под углом  $\beta$  к горизонту

$$F = mg \sin(\alpha + \beta),$$

$$T = fmg \cos \beta \cos(\alpha + \beta).$$

Отсюда видно, что по мере увеличения угла наклона поверхности сила  $F$ , вызывающая наклон корпуса вперед, возрастает, а сила трения  $T$  уменьшается (В).

В плоскости, перпендикулярной направлению движения (Г), величина этих сил выражается через угол наклона боковой поверхности дороги как

$$F = mg \sin \alpha, \quad T = fmg \cos \alpha.$$

Скольжение вбок начинается, когда  $f < \tan \alpha$ .

Нога, разумеется, в обоих случаях скользит вниз по уклону, а падение происходит в противоположную сторону.

