

УДК 536.12

ТРЕНИЕ ПРИ ХОДЬБЕ ЧЕЛОВЕКА

В. А. БАЛАКИН

Рассмотрены различные схемы контакта ног человека с опорой при выполнении шага. Показано, в каких случаях на скользкой опоре человек падает назад и вбок. Обоснованы требования к подошве обуви для скользкой опоры и к самой ходьбе.

Ключевые слова: трение, скользкая опора, лед, контакт, человек, подошва обуви, шаг, сила тяжести.

Введение. Вопрос о физической сущности ходьбы у подавляющего большинства людей вообще не возникает. Некоторые со времен школы помнят, что, благодаря трению на границе контакта подошва ноги — земля (дорога, пол и т.п.), человек имеет возможность передвигаться с той или иной скоростью. Жизненный опыт людей позволил им сформулировать понятия: “скользкая дорога”, “скользкий пол”, “скользкий лед”, когда резко возрастает вероятность падения человека при казалась бы осторожной ходьбе. Естественно возникают вопросы. Какой должна быть обувь при передвижении человека по скользкой дороге? Какой должна быть сама ходьба? Чтобы ответить на них, рассмотрим человека с позиций теории механизмов и машин.

Основные положения расчетной модели. Человек представляет собой сложную механическую систему (рис. 1). Позвоночник в ней для упрощения схемы представлен одним жестким звеном 2. Эта система имеет 62 подвижных звена и 61 кинематическую пару: из них $k_1 = 38$ одноподвижных (вращательных) и $k_3 = 23$ трехподвижных (сферических).

Число степеней свободы такой механической системы равно

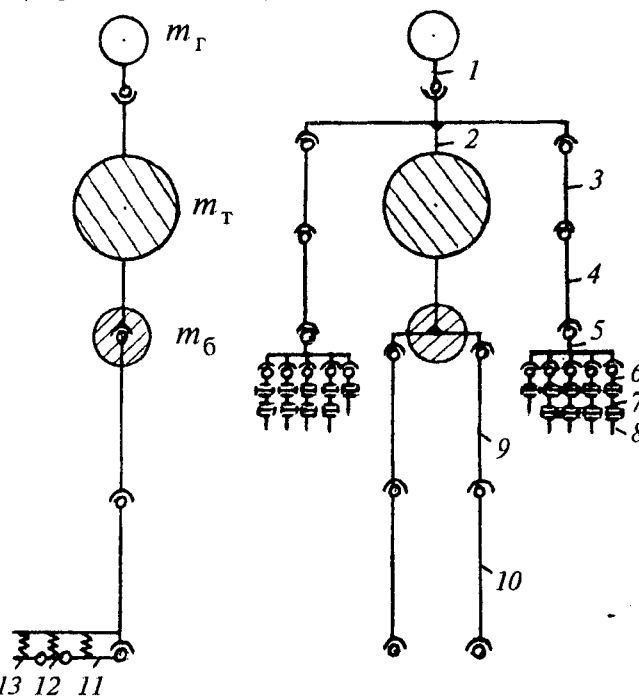


Рис. 1. Кинематическая схема скелета человека: 1 — голова; 2 — позвоночник; 3 — плечо; 4 — предплечье; 5 — кисть; 6—8 — фаланги пальцев; 9 — бедро; 10 — голень; 11 — стопа; 12, 13 — фаланги пальцев ног

$$W = 6n - 5k_1 - 3k_3 = 113.$$

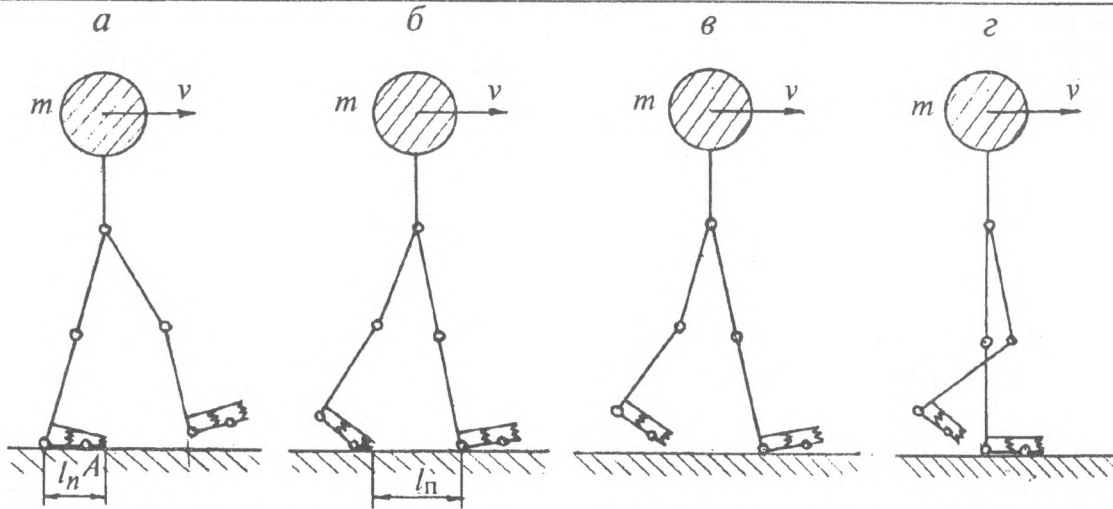


Рис. 2. Отдельные фазы шага человека: а — первая, б — вторая, в — третья, г — четвертая

Природа, совершенствуя человека, рационально распределила соотношения масс отдельных звеньев. В частности, масса бедер выполняет функции противовеса при наклонах туловища в разные стороны относительно вертикальной оси. Анализируя процесс трения при ходьбе человека, упростим задачу, рассматривая ее как плоскую: с меньшим числом подвижных звеньев и с заменой сферических кинематических пар — вращательными (рис. 2). При осуществлении шага человек системой мышц перемещает туловище вперед, возникающий при этом момент сил тяжести туловища и отдельных звеньев относительно точки опоры А способствует движению тела в направлении вектора скорости v (рис. 2а). Сделав шаг, пяткой другой ноги человек устанавливает контакт с поверхностью опоры, одновременно касаясь ее носком первой ноги (рис. 2б). Отрыв носка первой ноги, как будет показано ниже, чреват возможностью падения назад на скользкой опоре (рис. 2в). Завершая шаг, человек переносит свой вес на другую ногу (рис. 2г).

Центр масс человека при ходьбе совершает гармонические колебания по вертикальной координате y , которые можно описать уравнением

$$y = h_0 \cos(\pi x / L),$$

где $h_0 = H - H_0$. В связи с этим величина реакции опоры зависит не только от силы тяжести, но и от силы инерции.

Еще раз упростим задачу. Схему, изображенную на рис. 2а, представим в несколько ином виде (рис. 3а).

Масса человека приведена к коленному суставу и вращается с переменной угловой скоростью ω . Угловое ускорение ϵ направлено в сторону угловой скорости, а момент силы инерции $M_{и} = J\epsilon$ в сторону, противоположную угловому ускорению.

Очевидно, что закономерность изменения углового ускорения по времени $\epsilon(t)$ в процессе выполнения шага связана с необходимостью обеспечения движения центра масс человека с $v \approx \text{const}$. Эта программа, заложенная природой в головной мозг человека и

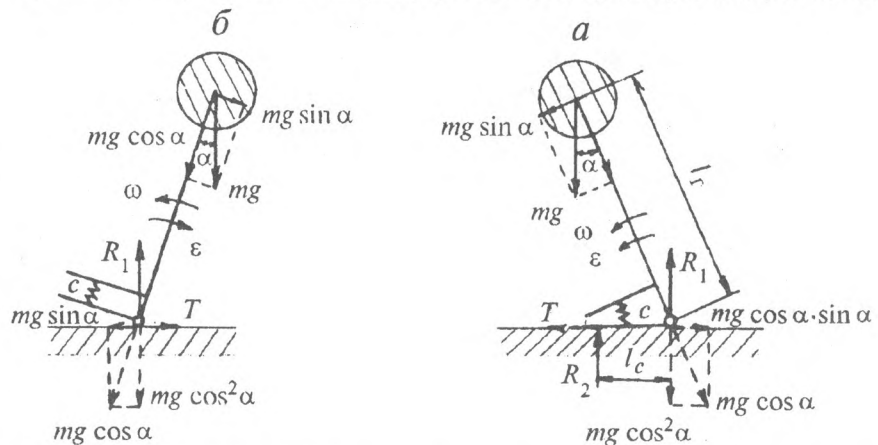


Рис. 3. Динамика голеностопных звеньев: а — первая фаза шага, б — третья фаза шага

выполняется автоматически.

Ра \mathbf{z} ложим силу тяжести на составляющие: вдоль голени — $mg \cos \alpha$ и в перпендикулярном направлении — $mg \sin \alpha$. Составляющую $mg \cos \alpha$ переносим по линии действия и прикладываем к пятке (показана пунктиром). Ее в свою очередь раскладываем на нормальную к поверхности трения составляющую — $R_1 = mg \cos^2 \alpha$ и тангенциальную составляющую $F = mg \sin \alpha \cos \alpha = mg [(\sin 2\alpha)/2]$.

Ступня человека может поворачиваться в пятке относительно голени на некоторый угол. Ее взаимодействие с голенью представлено упругой связью с коэффициентом жесткости c . Через эту упругую связь ступня воспринимает момент сил $M = mg \sin \alpha - J\epsilon$ относительно пятки, при этом ее реакция на этот момент равна

$$R_2 = mg (l_T/l_C) \sin \alpha - J\epsilon.$$

Отношение $l_2/l_c \approx 3$. Общая сила реакции опоры на вес тела человека в первой фазе движения выражается суммой $R = R_1 + R_2$. Будем считать, что $R = mg$. Тогда сила трения равна $T = fmg$. Отсутствие скольжения в зоне контакта подошва ноги — опора в первой фазе шага человека характеризуется условиями

$$T \geq F, \quad f \geq 0,5 \sin 2\alpha. \quad (1)$$

Теперь рассмотрим упрощенную схему другого неустойчивого положения тела человека, когда, установив контакт с опорой пяткой второй ноги, человек отрывает от опоры носок первой ноги (рис. 3б).

Угловое ускорение ϵ , соответствующее третьей фазе шага человека, направлено в сторону, противоположную угловой скорости, а момент инерции $M_{\text{и}} = J\epsilon$ — в сторону ω . В этом положении тела реакция опоры $R_2 = fmg \cos^2 \alpha$ меньше суммарной реакции $R_1 + R_2$ опоры, соответствующей первой фазе шага человека (рис. 2а).

Отсутствие скольжения в зоне контакта подошва — опора в третьей фазе шага человека характеризуется условиями $fmg \cos^2 \alpha \geq mg \sin \alpha \cos \alpha$, или

$$f \geq \operatorname{tg} \alpha. \quad (2)$$

Сопоставление правых частей условий (1) и (2) показывает, что при значениях угла α до 5° $\operatorname{tg} \alpha = (\sin 2\alpha)/2$, при значениях же $\alpha > 6^\circ$ $\operatorname{tg} \alpha > (\sin 2\alpha)/2$. Следовательно, при шаге с $\alpha > 6^\circ$ на скользкой дороге человек вероятнее всего упадет назад. Этому способствует также момент силы $mg \sin \alpha l_T$, если он больше момента $J\epsilon$.

Наиболее скользкими опорами являются: гладкий лед (в безветренную влажную погоду) при температуре воздуха около 0°C ; гладкий лед, покрытый пленкой воды (во время дождя); гладкий лед, покрытый тонким (5—10 мм) слоем снега; гладкий лед, покрытый пленкой воды, а сверху еще и только что выпавшим тонким слоем снега.

Схемы фрикционного контакта пятки ноги в третьей фазе движения с такими опорами представлены на рис. 4.

При взаимодействии пятки ноги с опорой площадь фактического контакта мала (рис. 4а), давление же $p_r = (mg \cos^2 \alpha)/A_r$ велико. Движение человека в этой фазе шага связано с вращением ступни относительно точки опоры. По сути дела в эти моменты времени возникает трение качения, которое сопровождается проскальзыванием поверхностных слоев каблука относительно опоры в зоне контакта. Процесс проскальзывания сопровождается фрикционным тепловыделением, нагревом и оплавлением льда. Вследствие влажнос-

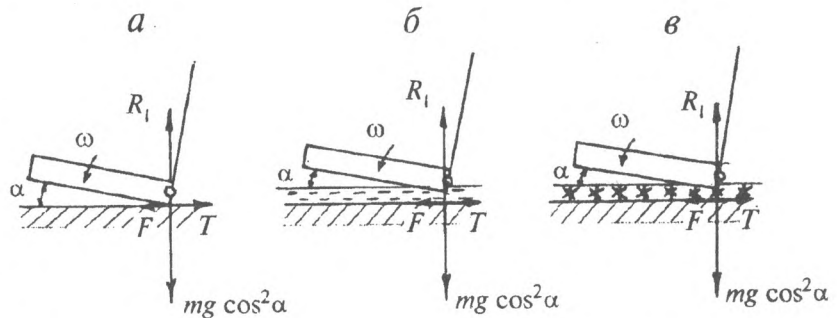


Рис. 4. Взаимодействие подошвы со льдом: а — сухой лед, б — мокрый лед, в — лед со снегом

ти воздуха вода может находиться на поверхности льда в любом случае. Однако толщина пленки воды в зоне контакта, показанного на рис. 4а, существенно меньше чем на опорах, изображенных на рис. 4б, в.

Если на поверхности льда находится слой снега (рис. 4в), нормальная нагрузка на лед передается через не имеющую сплошности прослойку снежинок с относительно большой суммарной поверхностью кристаллов. Кристаллы снега обычно насыщены влагой [1]. При очень высоких давлениях происходит процесс выдавливания влаги, и на площади фактического контакта снег — лед появляется пленка воды. Наличие жидкости в зоне контакта твердых тел ведет к возникновению гидродинамических эффектов [2—5]. Выражение для силы трения в рассматриваемых на рис. 4 случаях можно написать в виде

$$T_i = \tau_i A_{pi} .$$

Очевидно, что $\tau_1 > \tau_2$, поскольку на схеме, изображенной на рис. 4а, пленка воды может быть не на всей площади A_{pi} , соответственно режим трения будет полужидкостным. Если принять, что $\tau_2 \approx \tau_3$, то все равно $A_{p2} > A_{p3}$, следовательно

$$T_1 > T_2 > T_3 .$$

Следовательно, самый “скользящий” лед — покрытый порошей, менее “скользящий” — с пленкой воды, еще менее “скользящий” — гладкий сухой. Это хорошо известно рыбакам подледного лова, ежегодно систематически посещающим зимой водоемы.

Более точный анализ гидродинамических режимов трения в зоне контакта подошвы ноги — гладкая мокрая опора можно сделать задавшись соответствующими расчетными схемами (например, см. рис. 5). Условие (2) дает возможность для установления предельно допустимого шага человека в зависимости от его роста и состояния дороги. Приблизительные данные для случая движения человека по уровенной поверхности гладкой опоры представлены в таблице. При расчетах

принято, что $H = 2l_H$, $\sin \alpha = l/2l_H$, $l = H \sin \alpha$, $L = l + l_{п.}$

Значения коэффициентов трения в таблице для льда найдены экспериментально. Методика испытаний заключалась в следующем. При ходьбе по льду со все увеличивающимся шагом регистриро-

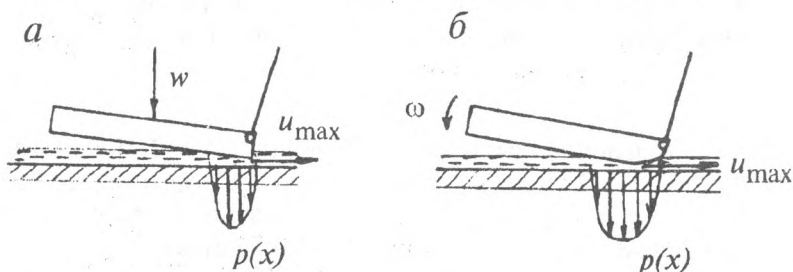


Рис. 5. Гидродинамические модели: а — движение подошвы с линейной скоростью w , б — движение подошвы с угловой скоростью ω

Зависимость предельного по длине шага человека L (м) от природы и состояния поверхности опоры

Природа и состояние опоры	f	α	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° С	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° С	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

вался момент проскальзывания пятки ноги. Длина шага измерялась рулеткой. При наличии снега и отпечатков ступни ноги измерения упрощались. Зная L , $l_{п}$ и $l_{н}$, определяли: $l = L - l_{п}$, $\sin \alpha = l/2l_{н}$, $f = \operatorname{tg} \alpha$.

Наиболее опасными для ходьбы человека в гололед являются участки дороги, наклоненные под некоторым углом β к уровенной поверхности земли (рис. 6а), и особенно "бугристая" дорога (рис. 6б).

На участке дороги, наклоненной под углом β к горизонту (см. рис. 6а)

$$F = mg \cos \alpha \sin (\alpha + \beta), \quad T = fmg \cos \alpha \cos (\alpha + \beta).$$

Отсюда видно, что сила F возрастает, а сила T уменьшается. Таким образом, незаметный (особенно под снегом) наклон дороги при одном и том же шаге человека может вызвать его падение.

На рис. 6б изображена схема движения человека в плоскости, перпендикулярной плоскости листа. При контакте ступни любой ноги с боковой поверхностью волнистой опоры силы F и T равны

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

Возможность падения человека вбок происходит при условии, если

$$f < \operatorname{tg} \beta, \quad \operatorname{tg} \alpha < \operatorname{tg} \beta \quad \text{или} \quad \alpha < \beta.$$

Падения человека вбок наиболее распространены в гололед. Именно они ответственны за переломы рук и ног. Из данных таблицы видно, что вероятность падения человека возникает уже при углах $\beta = 1^{\circ}30' \dots 2^{\circ}$.

Проведенный анализ позволяет обосновать требования к обуви человека для ходьбы в гололед. Подошва обуви должна быть ровной (без каблука), мягкой (для увеличения фактической площади контакта), пористой (для выжимания влаги в поры), с возможно большей площадью, в том числе и в каблучной части.

Заключение. В результате проведенных исследований особенностей ходьбы человека можно сделать следующие выводы.

1. Шаг человека можно условно разбить на четыре фазы. В первых двух фазах важную роль играет упругая связь стопы с голенью. Третья фаза чревата возможностью падения назад человека на ровной скользкой дороге.
2. Установлена связь длины шага человека при ходьбе по ровной опоре с природой и состоянием поверхности опоры.
3. Наиболее опасными для ходьбы человека в гололед являются участки дороги, наклоненные к горизонту под некоторым углом, и особенно "бугристая" дорога.
4. Обоснованы требования к подошве обуви человека для ходьбы в гололед.

Обозначения

x, y — координаты центра масс; v — скорость; ω — угловая скорость; ε — угловое ускорение; $m, m_{г}, m_{т}, m_{б}$ — масса человека, головы, туловища, бедер соответственно; g — ускорение свободного падения тела; J — момент инерции; $M_{и}$ — момент силы инерции; n, k — число подвижных звеньев и кинематических пар; α, β — угол наклона голени ноги и

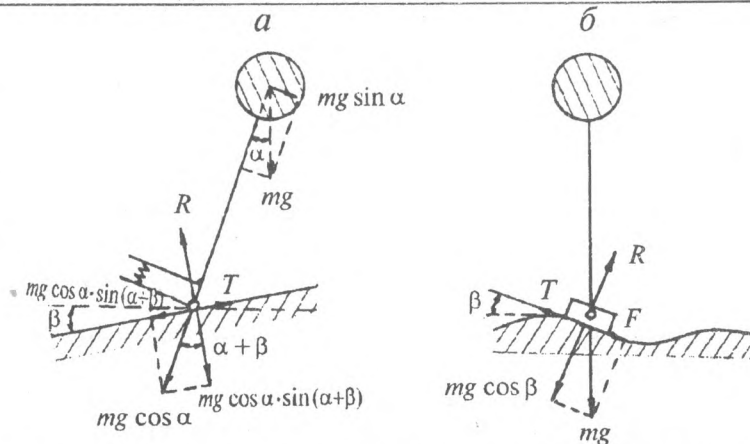


Рис. 6. Критические случаи контакта подошвы со льдом: а — поверхность льда под углом β к горизонту, б — контакт с боковой поверхностью ледяного выступа

поверхности опоры относительно горизонта соответственно; T — сила трения; f — коэффициент трения; H — рост человека; H_0 — расстояние от опоры до макушки головы человека во второй фазе шага; F — тангенциальная составляющая силы тяжести; R — реакция опоры; p_r — давление на фактической площади контакта; A_r — фактическая площадь контакта; τ — удельная сила трения; L — длина шага; $l_{п}$, $l_{г}$, $l_{н}$ — длина подошвы обуви, голени ноги, ноги; w — скорость ступни в направлении оси y ; u — скорость течения жидкости; p — давление жидкости; c — коэффициент жесткости; l_c — плечо реакции R_2 относительно шарнира.

Литература

1. Балакин В. А., Переверзева О. В. Трение по льду и снегу // Трение и износ, **12** (1991), № 3, 540—551
2. Балакин В. А. Отчего лед скользкий? // Наука и жизнь (1982), № 3, 110—111
3. Балакин В. А., Переверзева О. В. Фрикционный нагрев и оплавление поверхностей трения // Трение и износ, **15** (1994), № 4, 698—712
4. Балакин В. А., Переверзева О. В. Гидродинамические процессы в условиях оплавления поверхностей трения // Трение и износ, **16** (1995), № 3, 438—446
5. Балакин В. А. Определение фрикционных характеристик спортивных саней и бобов в процессе скольжения их по ледовой трассе // Трение и износ, **17** (1996), № 1, 35—42

Поступила в редакцию 12.03.97.

Balakin V. A. Friction in man's walking.

Various diagrams of contact are considered between man's feet and support in making steps. It is shown why a man falls backwards or sideways in walking on a slippery support. The requirements are justified to shoe's soles used for walking on the slippery support.