

О ЧЕМ НЕ ДУМАЕТ ГОРНОЛЫЖНИК

Опубликовано в «Кванте» №3 за 1990 год.

А. Абрикосов (мл.)

В мире зимних видов спорта горные лыжи, санки и бобслей стоят как бы особняком. Когда наблюдаешь такие спортивные состязания только по телевизору, возникает некоторое недоумение: можно ли вообще соревноваться, кто быстрее съедет с горки; не является ли разброс результатов простой случайностью? Ведь все мы решали задачу о скатывании тела с наклонной плоскости (рис. 1). Система уравнений, описывающих это движение, позволяет найти ускорение тела на начальном участке,

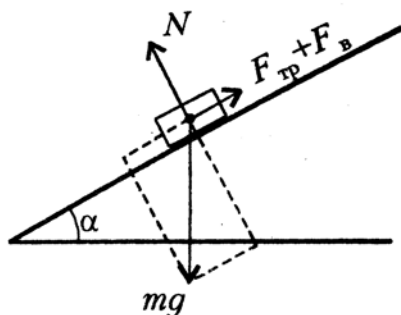


Рис.1. Тело на наклонной плоскости: $m\vec{g}$ - сила тяжести, $\vec{N}$ - сила реакции опоры, $\vec{F}_{тр}$ и $\vec{F}_в$ - силы трения и сопротивления воздуха

скорость установившегося движения, время движения по трассе от старта до финиша. Тут и возникает парадокс, оправдывающий недоумение телеболельщика: результаты не зависят от поведения спортсмена. Но ведь мы и не пытались учесть этот фактор в исходных уравнениях. А если попытаться?

Сразу приходит в голову мысль обратить внимание на силу трения и силу сопротивления воздуха. Коэффициент трения связан с выбором мази. Для саночников и лыжников-спусковиков (да и гигантистов тоже) нельзя недооценивать роль аэродинамики. Важно не только принять и сохранить правильную стойку, но и подобрать материал и хорошо сшить из него комбинезон. Примером может служить легендарная победа французской сборной в скоростном спуске. Французы первыми поняли, что трепещущий нагрудный номер - это недопустимая роскошь при скорости 100 км/ч. Под градом шуток они приклеили номера к костюмам пластырем. И повеселились на финише. Ныне в погоне за сотыми долями секунды даже конькобежцы надели сверхобтекаемые комбинезоны, а лыжников порой обдувают в аэродинамических трубах. Изогнутые палки позволяют принять более выгодную стойку. Испытываются новые мази и покрытия для лыж, сплавы для саночных полозьев. Описанное Л. Кассилем в книге «Ход белой королевы» похищение лыжной мази кажется невинной забавой, когда идет борьба за олимпийское золото.

Но если экипировка участников более-менее равноценна, на первый план выходят индивидуальные качества спортсмена - воля к победе, физическая и специальная подготовка. Мы расскажем, как законы механики позволяют применить свои физические данные и обратить волю к победе в драгоценные секунды результата. Чтобы понять основы лыжной техники, давайте отвлечемся от скоростного спуска (где так важны аэродинамика, умение правильно вести лыжи и удачно выбрать траекторию) и перейдем к слаломным дисциплинам. Здесь спортсменам приходится бороться за успех своими силами, проявляя временами акробатическую ловкость.

Трасса глазами лыжника

Вернемся к силам, которые действуют на лыжника на трассе. Мы, зрители, видим спортсмена в инерциальной системе отсчета, связанной со склоном или с телекамерой. Ну а для лыжника более естественна неинерциальная система, связанная с ним самим. Для вычислений она не очень удобна, но все-таки попробуем взглянуть на трассу глазами лыжника.

Будем предполагать, что речь идет о равномерном скольжении по окружности. В связанной с лыжником системе отсчета наряду с реальными силами (силы тяжести, трения, реакции опоры, сопротивления воздуха) нужно ввести центробежную силу инерции $F_{цб}$, направленную от центра дуги и равную

$$F_{цб} = \frac{mv^2}{R}$$

где v - скорость лыжника, R - радиус дуги (рис.2). Центр тяжести лыжника в этой системе неподвижен; значит, в любой момент времени равнодействующая приложенных сил равна нулю. Поэтому сила реакции снега должна быть направлена к центру дуги - ведь это единственная сила, которая может скомпенсировать $F_{цб}$. У саночников это обеспечивается наклоном жёлоба.

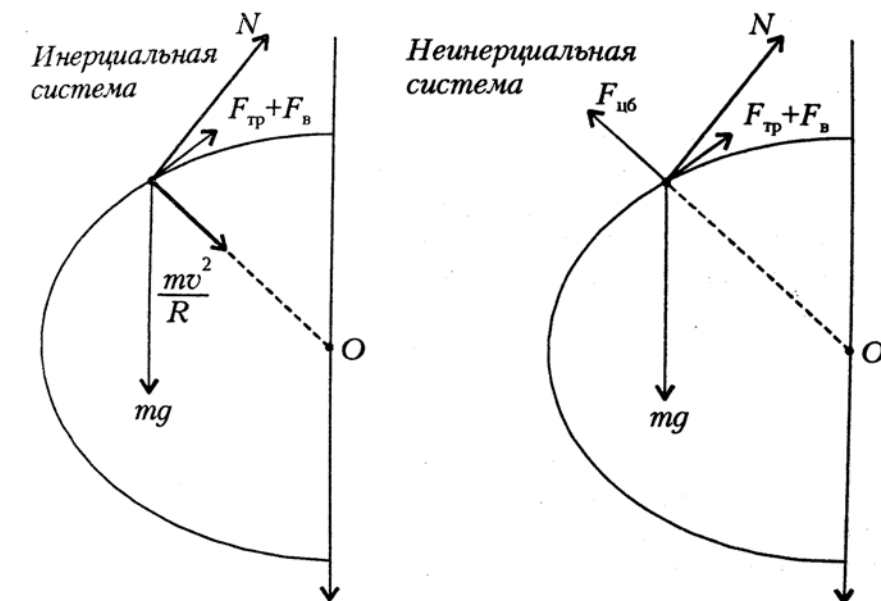


Рис.2. Инерциальная и неинерциальная системы отсчета. Здесь и далее на рисунках вертикальная прямая со стрелкой обозначает линии склона

А у лыж для лучшего сцепления со снегом скользящая поверхность имеет металлические канты, и при повороте лыжи «кантуют» - спортсмен наклоняет лыжи на ребро, так чтобы они зацепились за снег металлическими кантами, как коньки. Горизонтальная составляющая силы реакции снега сообщает спортсмену центростремительное (в инерциальной системе отсчета) ускорение. Чтобы уверенно чувствовать себя на жестких и льдистых склонах, канты нужно регулярно точить, особенно перед соревнованиями.

А кстати, какие нагрузки испытывает спортсмен? Давайте прикинем. Средняя скорость слаломиста около 10 м/с при радиусе дуги порядка 5 м, и $F_{цб} = mv/R \approx m \cdot 20 \text{ м/с}^2$, т.е. равна примерно удвоенному весу лыжника. Эту силу нужно векторно сложить с перпендикулярной склону составляющей силы тяжести $mg \cos \alpha$ (обычно $\alpha < 30^\circ$, $\cos \alpha > 1/2$), так что суммарная перегрузка превышает $2g$, причем падает она в основном на «внешнюю» ногу (попытка встать на внутреннюю лыжу, как правило, заканчивается падением). Ну а по характеру своему нагрузка весьма напоминает испытание на вибростенде. Поэтому спортсмены-горнолыжники даже летом занимаются общей физической подготовкой. Например, приседают со штангой.

Оптимальная траектория ± 10 см

Теперь мы начинаем «раскладывать» успех на отдельные слагаемые. Почему лыжника, скатывающегося с горы, нельзя уподобить, скажем, бусинке, соскальзывающей по гладкой изогнутой проволоке? В первую очередь, потому, что он сам выбирает маршрут движения в коридоре, заданном флагами (у саночников - желобом). Говоря научным языком, склон горы представляет собой двумерное пространство, где спортсмену (даже если считать его материальной точкой) предстоит найти оптимальную траекторию, в то время как движение бусинки чисто одномерное.¹

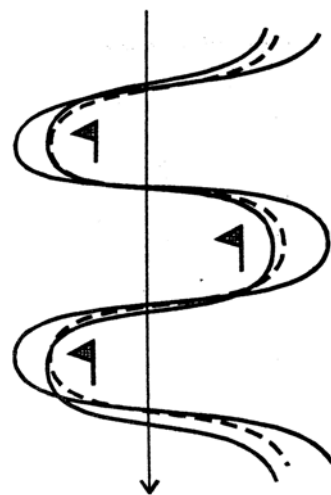


Рис.3. Варианты выбора маршрута на трассе слалома. Выделенная кривая – оптимальная траектория

Вид оптимальной траектории определяется сочетанием целого ряда факторов. Прежде всего, желательно пройти трассу кратчайшим путем, как можно меньше уклоняясь от линии склона (рис.3). При этом мы выигрываем не только из-за сокращения расстояния, но и

за счет увеличения средней крутизны маршрута - чем круче склон, тем больше скатывающая сила и тем меньше сила трения. Поэтому слаломисты стараются идти как можно ближе к флагам, отбивая их плечом и корпусом.

Можно оценить потерю времени вследствие удлинения пути. Пусть отклонение от оптимальной кривой составляет всего лишь ± 10 см. Того же порядка будет удлинение каждой из образующих ее дуг. На слаломной трассе из 50 ворот при средней скорости 10 м/с проигрыш окажется вполне ощутимым:

$$\Delta t \approx \frac{50 \cdot 0.1 \text{ м}}{10 \text{ м/с}} = 0,5 \text{ с}.$$

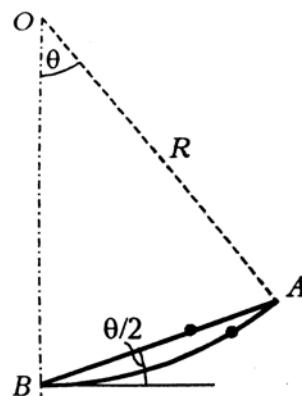


Рис.4. Бусинки на проволочках. Время соскальзывания по дуге АВ меньше, чем по стягивающей хорде

¹ В каком-то смысле «самым одномерным» является бобслей, где очень многое зависит от умения экипажа разогнать снаряд на старте.

В то же время в скоростном спуске или слаломе-гиганте, где ворот меньше, а средняя скорость больше, этот фактор скажется незначительно.

Однако, как ни странно, «идти на флаг», т.е. спрямлять участки пути между флагами, также невыгодно. Во-первых, при этом придется сбрасывать скорость, чтобы вписаться в более крутой поворот, а во вторых, время движения по прямой вовсе необязательно наименьшее.

Рассмотрим простой пример. Бусинка скатывается без начальной скорости из точки А в точку В сначала по дуге окружности, а затем по стягивающей ее хорде (рис.4). Если угловой размер дуги мал, то время движения в первом случае равно четверти периода колебаний математического маятника длиной R (трением пренебрегаем)Ж

$$t_1 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{R}{g}}.$$

Длина хорды равна $l = 2R \sin \theta/2$, бусинка движется с ускорением $a = g \sin \theta/2$, и во втором случае время равно

$$t_2 = \sqrt{\frac{2l}{a}} = 2\sqrt{\frac{R}{g}}.$$

Отношение $t_1/t_2 = \pi/4 < 1$, т.е. по дуге бусинка скатится быстрее. Никакого чуда здесь нет. Хотя путь вдоль дуги длиннее, он начинается с более крутого участка. Бусинка быстрее разгоняется, и выигрыш в скорости оказывается важнее, чем проигрыш в расстоянии. С этой точки зрения траектория, составленная из плавно сопряженных дуг, также оказывается лучше, чем та, где резкие повороты перемежаются спрямленными участками.

Еще Галилей интересовался формой брахистохроны - линии наискорейшего спуска от одной точки к другой. Он считал, что это дуга окружности (как в рассмотренном нами примере). В 1697 году И. Бернулли показал, что в отсутствие трения это другая магическая кривая - циклоида. Уравнение брахистохроны используют при проектировании санных трасс и «американских» (они же «русские») горок. Но рассчитать, не выходя из кабинета, оптимальный путь лыжника не удастся. Спортсменам приходится полагаться на собственную интуицию, опыт, тщательно запоминать расположение флагов на трассе. И, следуя совету замечательного французского горнолыжника Ж.-К. Килли, «думать на пять ворот вперед».

Механизм торможения, или Что такое хорошие лыжи

совершенствованием инвентаря. Как до появления фиберглассовых шестов нельзя было и мечтать о шестиметровых прыжках, так едва ли можно было вообразить стиль нынешних лыжников, стоя на трофейных гикоревых лыжах с креплениями «Кандахар».

Для того чтобы «быстро бегать», лыжи должны не только хорошо скользить, но и как можно крепче держаться за склон, не соскальзывая в поперечном

направлении. Действительно, из формулы для центробежной силы инерции видно, что скорость, с которой можно пройти вираж, пропорциональна квадратному корню из силы F поперечного сцепления лыж со снегом:

$$v = \sqrt{\frac{FR}{m}}.$$

Однако дело не только в этом. Соскальзывание является основной причиной потери скорости (драгоценная энергия расходуется на «сгребание» снега со склона). Обычно лыжники пользуются боковым соскальзыванием, когда нужно погасить скорость, преодолеть крутой участок, где новичок не надеется на свои силы, или просто загладить склон после тренировки. Но если спортсмена «поташило на повороте», это сразу же зафиксирует секундомер. Отсюда стремление поставить лыжу как, можно круче к склону и врезаться кантами в снег. (А на открывающейся при этом скользящей поверхности особенно эффектно выглядит реклама лыжной фирмы. Правда, появилась она там совсем недавно.)



Рис.5. «Телемарк». Лыжник делает выпад вперед внешней лыжей и балансирует руками. Современное снаряжение не позволяет поворачивать таким образом



Рис.6. «Плуг». Стоя на внутренней лыже, лыжник «упирается» в снег отставленной внешней



Рис.7. «Христиания» соскальзыванием. Параллельные лыжи заматают меньшую площадь, чем при «плуге», поэтому торможение меньше

У истоков развития горных лыж стоял Ф. Нансен. Великий полярник, политический деятель, лауреат Нобелевской премии мира был также автором первой книги о горных лыжах. Во времена Нансена катались в мягких кожаных ботинках на жестких неокантованных лыжах. А первым собственно горнолыжным приемом был «телемарк» (рис.5), этот красивый поворот требовал ловкости и был чреват падением. На смену «телемарку» пришел более демократичный «плуг» (рис.б). По сей день многие лыжники начинают с него свою карьеру. Это самый простой, но, увы, самый медленный способ. Последнее слово осталось за «христианией» - поворотом на параллельных лыжах. Постепенно совершенствуясь,

он прочно занял главное место в техническом арсенале горнолыжника. Сначала «христианию» выполняли соскальзыванием (рис.7). Внутренняя лыжа разгружена, корпус лыжника подан чуть вперед, поэтому носок сильнее «держится» за снег. В ходе движения задники немного соскальзывают, и получается поворот, способ был быстрее и надежнее предшествующих.

А дальше уже сама собой, просто и естественно напрашивается идея «резаного» поворота (рис.8), при котором сопротивление движению минимально. Выросли скорости, и требования к снаряжению сменились на прямо противоположные. Теперь делают жесткие и высокие пластиковые ботинки, которые передают усилие прямо от голени к лыже и позволяют хорошо ее закантовать. А сама лыжа - мягкая, она изгибается по дуге и выписывает поворот, оставляя узкий «резаный» след. Чтобы лыжа легко принимала форму дуги, в середине, где давит ботинок, ее делают немного уже, чем с концов. При кантовании сцепление со снегом оказывается максимальным на концах, и давление посередине прогибает лыжу нужным образом.

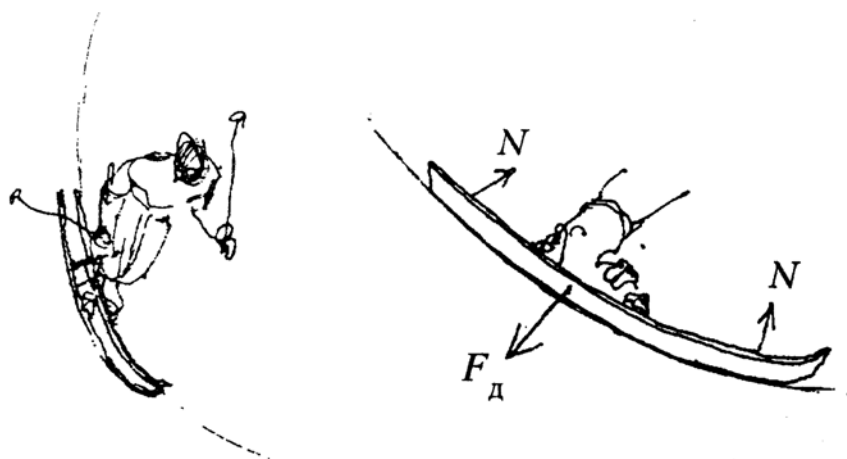


Рис.8. «Резаный» поворот. Лыжи прогнулись и не сгребают снег; в этом случае торможение минимально

Сделать хорошие лыжи непросто, ведь надо убить по крайней мере двух зайцев. Во-первых, лыжа должна мягко гнуться по дуге в продольном направлении. Во-вторых, чтобы не соскальзывать, она должна быть жесткой «на пропеллер», т.е. противостоять скручиванию. Не говоря уже о том, что лыжа должна держать направление и не гнуться в плоскости склона («саблевидный» изгиб)). Найти удачное сочетание хотя бы этих качеств - сложная конструкторская задача, причем выбор конкретного решения неоднозначен. Для слалома, где виражи круче, а скорости меньше, спортсмены берут лыжи короче и податливее, чем для слалом-гиганта. Свои требования предъявляют метеоусловия и качество снега. Поэтому буквально перед самым стартом будущий чемпион решает, какие из подготовленных накануне лыж послужат ему сегодня.

К счастью, любители не знают таких проблем. Скорее наоборот, ведь спортивный инвентарь зачастую «строг» и не прощает мелких огрехов. Так что те отборные лыжи, которые мы видим по телевизору, - это лишь верхушка айсберга.

А миллионы более комфортных туристских лыж верно служат многочисленным любителям и «фанатам» - тем, на кого опирается большой спорт.

Поворот с ускорением, или Фокусы на кривой дорожке

Наконец, мы переходим к важнейшему элементу, без которого немыслима техника современного слалома и слалома-гиганта. Несмотря на ясность лежащих в основе физических принципов, этот раздел может вызвать разногласия. До сих пор некоторые специалисты не верят, что спортсмен может ускорять себя при спуске с горы, хотя кинограммы движения хороших лыжников доказывают это. Какие возможности таит активное ведение лыж, показал еще в самом начале своего фантастического взлета Ингемар Стенмарк. «Шведский ураган» опережал соперников больше чем на секунду, в то время как борьба шла за десятые доли.

Горнолыжников, пожалуй, может удивить непривычный взгляд на «данное им в ощущениях». Ни в коем случае не посягая на личный опыт читателей, мы лишь предлагаем свою точку зрения на «объективную реальность».

Давайте оглянемся, не подскажут ли разгадку горнолыжного ускорения другие виды спорта? Скажем, обычные беговые лыжи...

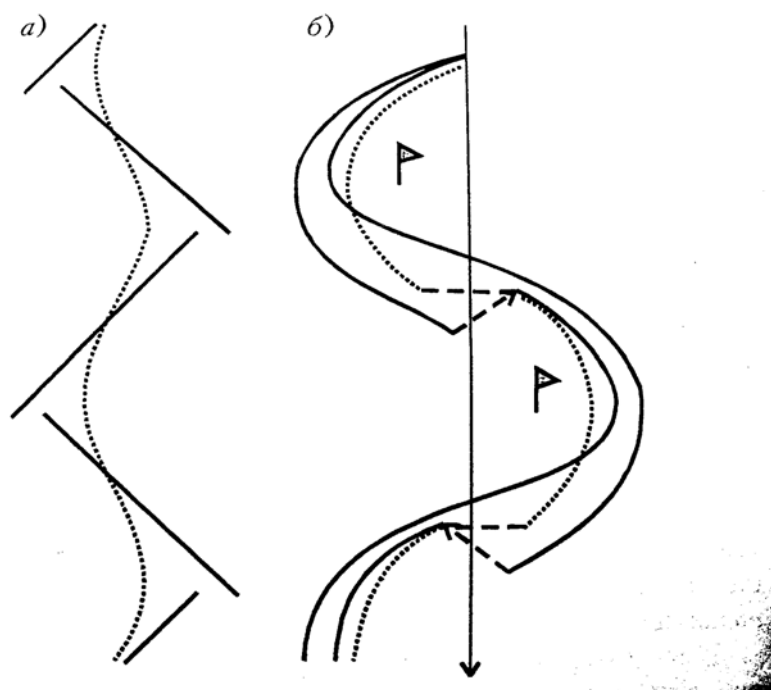


Рис.9. Коньковый ход на ровном месте (а) и на склоне (б). Выделенные кривые – траектории центра тяжести лыжника, остальные – следы лыж

Теперь здесь правит коньковый ход (рис.9, а). Благодаря ему выросли скорости. Не перенять ли опыт слаломистам? Идея неновая. Ход «коньком» был опробован именно в горных лыжах, а уже потом спустился на равнину. На склоне это выглядит так: каждый поворот сопрягается с одним отталкиванием внешней лыжей, и следы слегка расходятся от начала к концу дуги(рис.9,б). Казалось бы, возникает выигрыш в скорости, но за него приходится платить. Во-первых, «конек» требует очень точной координации работы ног и соблюдения равновесия когда

лыжник загружает внутреннюю ногу. А во-вторых, затягивается переход из поворота в поворот. В точках пересечения траектории с линией склона спортсмен «перекладывается» из дуги в дугу, перенося свой центр тяжести над лыжами. Затем начинается следующий поворот. Если лыжи стоят широко, то перекладывание займет больше времени, вырастет спрямленный участок траектории. Кроме того, лыжи дольше будут не закантованы, проскальзывание приведет к торможению. Сильнее всего это заметно на льдистых трассах, где так трудно уцепиться за склон. Вот и получается, что на горе «конек» – не самая резва лошадка.

Хорошо бы и ускориться, и лыжи вести поуже. Возможно ли такое? Присмотримся еще раз к коньковому ходу (см. рис.9, а). Центр тяжести конькобежца или лыжника-гонщика описывает волнообразную траекторию (выделенная линия на рисунке). Корпус спортсмена опережает опорную лыжу и движется под углом к ней. При этом (а не при переступании с ноги на ногу) совершается работа и набирается скорость. Поймите, но ведь слаломист тоже движется по «змейке»! Причем его корпус вовсе не следует за лыжами буквально. В конце поворота центр тяжести спортсмена «догоняет» лыжи, проходит над ними и уходит вперед - внутрь следующей дуги. Нельзя ли дополнить это отталкиванием? Оказывается, можно.

Правда, такой толчок имеет мало сходства с «коньком» и совсем не бросается в глаза. Составляют его две фазы: сгибание и разгибание. Вначале, при подходе к точке сопряжения дуг (к точке пересечения траектории с линией склона), когда корпус нагоняет лыжи, спортсмен сгибает ноги, словно «амортизируя» бугор. Такое сгибание (иногда очень резкое «проглатывание» -авальман) позволяет сохранить набранную скорость, избежать соскальзывания лыж. Сразу за точкой сопряжения следует разгибание, которое выносит корпус чуть вперед, сообщая ему добавочный импульс по линии склона. К концу дуги лыжи снова опережают спортсмена, и следуют новые сгибание (амортизация) и разгибание (отталкивание). Причем на узко поставленных лыжах.²

Лучше понять физику такого, казалось бы, нехитрого процесса нам поможет известное совсем не зимнее развлечение.

Летние аналоги

Итак, давайте немного отвлечемся и вспомним, как летом мы раскачиваемся на качелях - больших парковых качелях-лодках. Представьте себе - вот качели, постепенно замедляясь, летят вверх. В тот миг, когда они зависают в верхней точке, мы приседаем и вот уже мчимся вниз, так что ветер свистит в ушах. Внизу, когда перегрузка максимальна, встаем и снова, с замиранием сердца, вверх, уже чуть выше, чем в прошлый раз. Центр тяжести системы описывает при раскачивании восьмеркообразную спираль (рис.10).

Раскачивание колебательной системы за счет изменения ее параметров (на качелях это расстояние от точки подвеса до центра тяжести) называется па-

² Наблюдая за горнолыжниками, вы, возможно, замечали, что часто, сопрягая дуги, мастера делают как бы приставной шаг с лыжи на лыжу. Это не должно сбивать вас с толку. Порой это продиктовано спецификой трассы, а иногда... Даже великие иногда ошибаются.

раметрическим резонансом. Вставая в нижней точке, мы совершаем положительную работу против суммы силы тяжести и центробежной силы инерции (мы рассматриваем движение в неинерциальной системе отсчета). В верхней же точке центробежная сила инерции равна нулю, а от силы тяжести остается лишь проекция $mg \cos \alpha$. Поэтому отрицательная работа при приседании (с той же амплитудой) по модулю меньше. Полная работа, совершенная за цикл, положительна, и энергия системы растет.

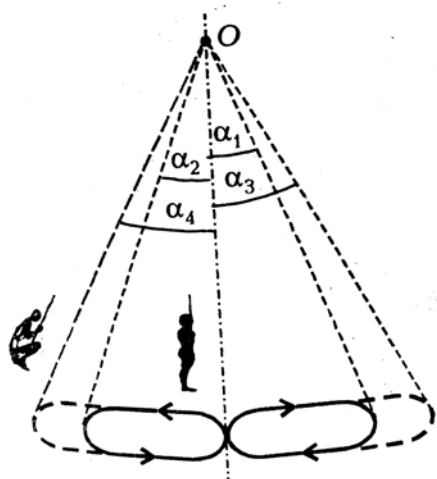


Рис.10. Движение центра тяжести при раскачивании на качелях

А теперь попробуем прикинуть энергетический баланс горнолыжника, как мы только что это сделали для качелей. Здесь нас подстерегает сюрприз. На первый взгляд, все очень похоже. При движении по дуге на лыжника тоже действуют сила тяжести и центробежная сила инерции (рис.11). Угол между ними меняется, так что их равнодействующая минимальна в начале дуги (F_{p1}) и достигает максимума в конце (F_{p2}). Приседая, лыжник совершает отрицательную работу, а вставая - положительную. Однако когда он разгибается в начале дуги, на него действует меньшая сила, чем при сгибании в конце. Значит, суммарная работа, совершаемая за цикл сгибания - разгибания (амортизация - толчок), будет отрицательна. Парадокс?! Казалось бы, гораздо естественнее совершать положительную работу и увеличивать кинетическую энергию.

Никакой ошибки здесь нет. Просто до сих пор мы не заботились особенно о балансе энергии и думали только о том, как сократить потери и выиграть скорость. В этой теоретической гонке за секундами немудрено было и перегнуть палку. Настало время поставить все на свои места. Давайте запишем закон сохранения энергии на каком-либо участке трассы:

$$\Delta E = mg\Delta h + \frac{\Delta(mv^2)}{2} = A_{TP} + A_B + A_{\text{ЛЫЖН}}$$

В левой части стоит изменение потенциальной ($mg\Delta h$) и кинетической ($\frac{\Delta(mv^2)}{2}$) энергии лыжника, в правой - работа, совершаемая самим лыжником, силами трения и сопротивления воздуха. Каковы соотношения между этими слагаемыми? Начнем с левой части уравнения. Средняя скорость слаломиста на трассе меняется не слишком сильно. Поэтому второе слагаемое едва ли существенно, т.е. $\frac{\Delta(mv^2)}{2} \approx 0$. А вот первое наоборот, велико. Чтобы набрать обычную для слаломиста скорость $v \sim 10 \frac{м}{с}$, достаточно потерять всего лишь $\Delta h = v^2/(2g) = 5 м$ высоты. (В больших горах перепады, как правило, исчисляются сотнями метров.)

Теперь о правой части. Торможение лыж при резаном повороте очень мало. Сопротивление воздуха зависит от скорости. Однако обе эти силы не мешают спусковикам превышать скорость 100 км/ч, т.е. 28 м/с. Но трасса слалома на такой скорости сливается в непробиваемый частокол, становится непроходимой.³ И задача слаломиста - не увеличивать скорость, а по крайней мере сдерживать ее рост. Так что отрицательная работа, совершаемая лыжником в цикле сгибания - разгибания, есть необходимое условие баланса энергии:

$$A_{\text{ЛЫЖН}} < 0$$

Итак, чтобы выиграть, горнолыжник должен совершать работу, которая не становится легче от знака «минус». Законы физики подтверждают: за победу надо бороться!

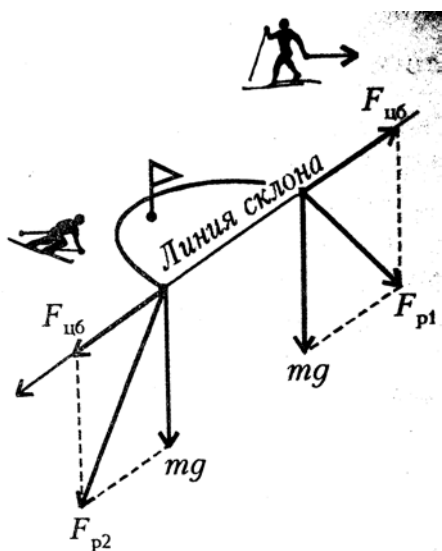


Рис.11.Равнодействующие сил тяжести и центробежной в начале и в конце дуги:

$$\vec{F}_{p1} > \vec{F}_{p2}$$

Чем же такой способ понижения энергии выгоднее постепенного расхода при повороте соскальзыванием? Во-первых, заменой статических нагрузок на менее утомительные динамические. Нет нужды что есть силы упираться кантами в снег и терять в конце дуги набравшуюся скорость. А во-вторых, вспомним пример с двумя бусинками (см. рис.4). Если энергия лыжника тратится на трение, его движение по дуге можно грубо представить себе равноускоренным, как у бусинки на прямой проволочке. А при повороте с ускорением лыжник сначала совершает работу и набирает скорость, а гасит ее излишек в конце дуги. В итоге "средняя скорость больше, и на поворот уходит меньше времени (как у бусинки на дуге). Режим сгибания - разгибания оказывается дополнительным средством контроля скорости.

Свобода движений и уникальные динамические возможности отличают горные лыжи от санок и бобслея и роднят с молодой еще роликовой доской - скейтбордом, или просто скейтом. Кстати, вот прекрасный пример того, что ускоряться не обязательно «коньком»: куда шагнешь, если обе ноги стоят на одной доске? Тем не менее, ускорение за счет параметрического резонанса позволяет даже преодолевать на скейте небольшие подъемы. А механизм все тот же: корпус наклонен внутрь дуги, значит, разгибание в начале поворота и сгибание в конце дают суммарный импульс в направлении движения. И вас не должно смущать, что на скейте сгибание сопровождается энергичным скручиванием в поясице, помогающим вести дугу. С точки зрения внешнего наблюдателя, главную роль играет перпендикулярная оси доски составляющая силы трения (на лыжах это составляющая силы реакции снега при кантовании). При движении по «змейке» она меняется по величине и по направлению, но в среднем направлена вперед.

³ Разумеется, на слаломной дуге трение лыж больше, чем на спуске, но не настолько, чтобы изменить последующий вывод.

Вот и весь секрет. Только не обольщайтесь, ведь наша теоретическая модель «сесть - встать на два счета» предельно упрощена. Учиться плавать надо в воде. И не было еще на свете лыжника, не измерившего собой пару-тройку больших сугробов.

Заключение

Ни с чем не сравнимое чувство удивительной свободы, когда весь мир рвется тебе навстречу, сверкая искрами морозного снега, не описать формулами. Маленькие дети учатся кататься, подражая взрослым, и не думают о физике. Но знание законов Ньютона открывает второй путь - от головы к ногам.⁴ Может быть, именно здесь горнолыжник найдет ответ на какие-то нерешенные вопросы. Ну а не горнолыжник... Неужели теперь, когда вы столько знаете, вам не захотелось попробовать? Право же, эта мечта достойна воплощения.

⁴ А здесь есть еще о чем подумать. Например, о моментах сил, действующих на горнолыжника. Ведь мы даже не касались этой важнейшей, но сложной темы.