

Глава 1

Полёт мяча: общие закономерности



- НАЧАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ
- ДАЛЬНОСТЬ ПОЛЁТА

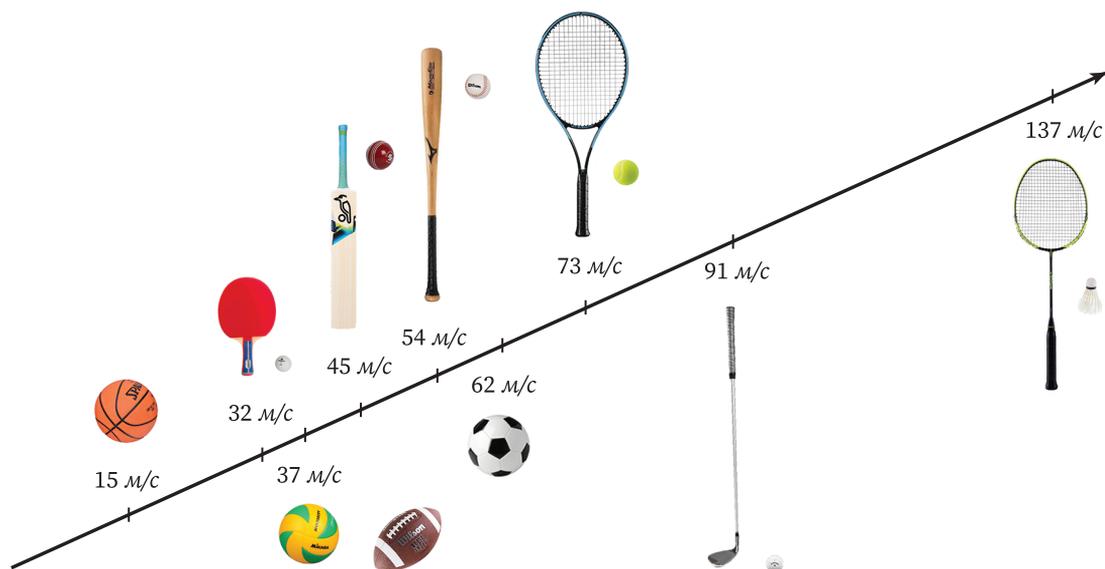
- ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА
- ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОТОК

- СИЛА МАГНУСА
- КОЭФФИЦИЕНТ ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ

Как правило, в играх с мячом требуется послать мяч вперёд максимально быстро. Из всех снарядов для спортивных игр максимальная скорость принадлежит не мячу, а волану для игры в бадминтон: 137 м/с, или почти 500 км/ч. Интуитивно понятно, что чем легче снаряд, тем больше при том же усилии будет скорость его полёта. Однако не всё так просто! Сопротивление воздуха оказывает порой определяющее влияние на траекторию полёта, а стало быть, большую роль играет форма снаряда: тот же волан за счёт своей формы замедляется гораздо быстрее мяча, а для мячей большое значение имеет шероховатость поверхности.

В спортивных играх есть два способа отправить мяч вперёд — бросить его рукой (баскетбол, вратарь в футболе, гандбол) или ударить по нему рукой (волейбол), ногой (футбол) или специальным спортивным снарядом — клюшкой, битой или ракеткой (гольф, большой и настольный теннис, бейсбол и др.). На рис. 1.1 показана максимальная скорость, которую может приобрести мяч в разных видах спорта. Мы видим, что большие скорости достигаются при ударе по мячу с использованием спортивных снарядов.

Рис. 1.1
Скорости мячей и не только
в разных видах спорта



Обсудим физические причины этого. Сначала рассмотрим удар по мячу ракеткой, клюшкой или другим спортивным снарядом. Пусть масса мяча — m , масса ракетки — M . Скорости мяча и ракетки до и после удара обозначим v , V и v' , V' соответственно.

Параметр $e = \frac{V' - v'}{V - v}$ назовем коэффициентом восстановления.

Его величина показывает, насколько значима потеря энергии при ударе: $e = 0$ соответствует абсолютно неупругому соударению, $e = 1$ — абсолютно упругому. Конечно, на практике реализуется промежуточный случай, когда e лежит в интервале от 0 до 1.

Из закона сохранения импульса $MV + mv = MV' + mv'$ (скорости взяты по модулю) сразу следуют уравнения, связывающие между собой скорости мяча и ракетки до и после удара:

$$v' = v - (1 + e) \frac{M}{m + M} (v - V),$$

$$V' = V + (1 + e) \frac{M}{m + M} (v - V).$$

Ограничимся случаем, когда скорость ракетки до удара много больше скорости мяча, $V \gg v$. В этом случае из первого уравнения сразу получим соотношение, связывающее скорость ракетки до удара и скорость полёта мяча после удара:

$$\frac{v'}{V} = \frac{1 + e}{1 + m/M}.$$

Отсюда мы видим, что если удар почти упругий (как в гольфе или теннисе), то $v' \approx 2V(1 - m/M)$, то есть скорость мяча после удара примерно в два раза превышает скорость ракетки. Это же

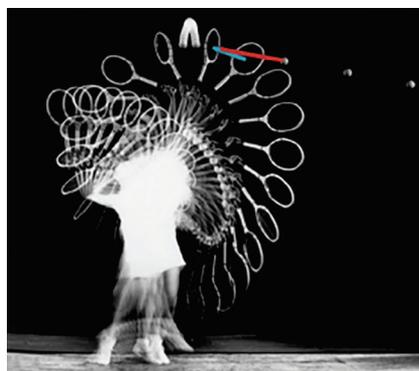
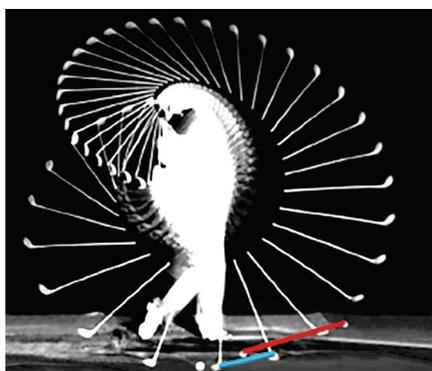
рассуждение применимо, если волейболист бьёт по мячу рукой или футболист — ногой: скорость полёта мяча вдвое больше скорости движения руки или ноги спортсмена.

На рис. 1.2 показаны хронофотографии гольфиста и теннисиста в момент удара. Из них видно, что расстояние, которое проходит в единицу времени мяч (красная линия), действительно примерно вдвое больше расстояния, которое за то же время проходит клюшка или ракетка (синяя линия), то есть скорости отличаются примерно в два раза.

Для того чтобы записать отношение $M/(m + M)$ при $M \gg m$ в таком виде, достаточно устремить к нулю старшие степени переменной t (где $t = m/M$) в очевидном алгебраическом тождестве $1/(1+t) = 1 - t + t^2 - t^3/(1+t)$. О предельных переходах мы поговорим в нашем математическом приложении в конце книги.

Рис. 1.2

Хронофотография удара в гольфе и в теннисе. Движение мяча (красная линия), движение клюшки или ракетки (синяя линия)



А как мы можем трактовать бросок мяча рукой? Если рассмотреть этот процесс в обратном порядке, как бы прокрутив видео назад, мы увидим, что бросок мяча рукой соответствует абсолютно неупругому удару мяча и руки. Ведь в этом «обратном» видео мяч в конце концов «слипнется» с рукой. Значит, для броска можно принять $e = 0$, и тогда начальная скорость полёта мяча будет примерно равна скорости движения руки или ноги. Это хорошо видно на хронофотографии бросающего

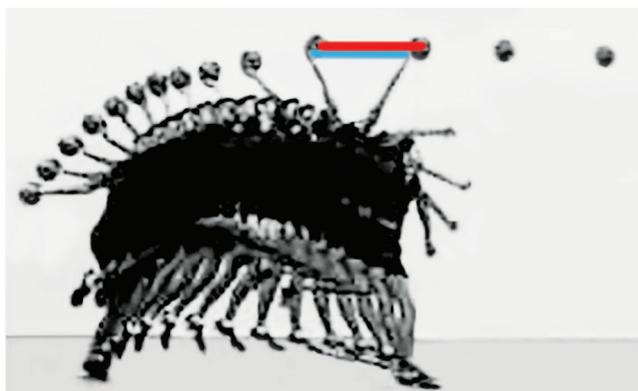
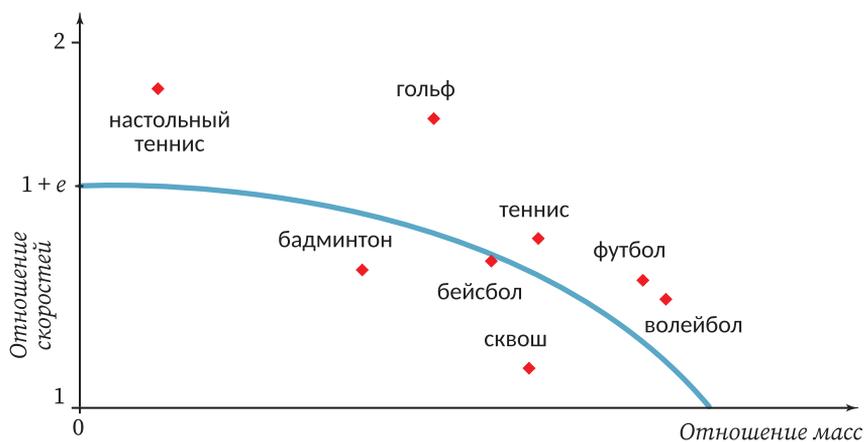


Рис. 1.3
Бросок в гандболе

гандболиста (рис. 1.3). Теперь становится понятно, почему максимальная скорость полёта мяча в волейболе, с одной стороны, и баскетболе или гандболе, с другой, отличаются примерно вдвое!

Заметим, однако, что у броска рукой есть одно существенное отличие от удара клюшкой или битой. Из полученного выражения видно, что при ударе отношение скоростей v'/V будет зависеть от соотношения масс m/M . При этом если масса мяча будет много больше массы клюшки, то и начальная скорость мяча может быть сколь угодно малой. Если вы пнёте ногой с размаху

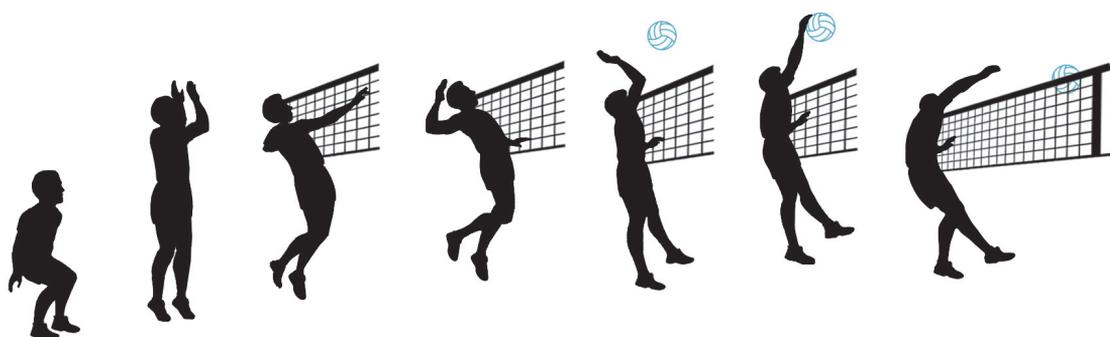
Рис. 1.4
Зависимость отношения скоростей мяча после удара и биты до удара от отношения их масс



двухпудовую гирию вместо футбольного мяча, то она никуда не полетит, только ноге придётся плохо. А вот при броске рукой мяч движется до точки отрыва вместе с рукой спортсмена и его скорость быть меньше скорости руки никак не может!

А почему удар по мячу волейболиста придаёт ему меньшую скорость по сравнению с ударом спортсмена, использующего специальный снаряд, например биту или клюшку? Дело в том, что скорость руки в момент удара по мячу равна $V = L \cdot \Omega$ (L — длина руки, Ω — угловая скорость движения ладони). Поэтому при выполнении атакующего удара, например, в волейболе игроку необходимо обеспечить максимальную угловую скорость движения ладони, то есть высокая скорость мяча достигается за счёт максимизации Ω .

*Рис. 1.5
Удар в волейболе*

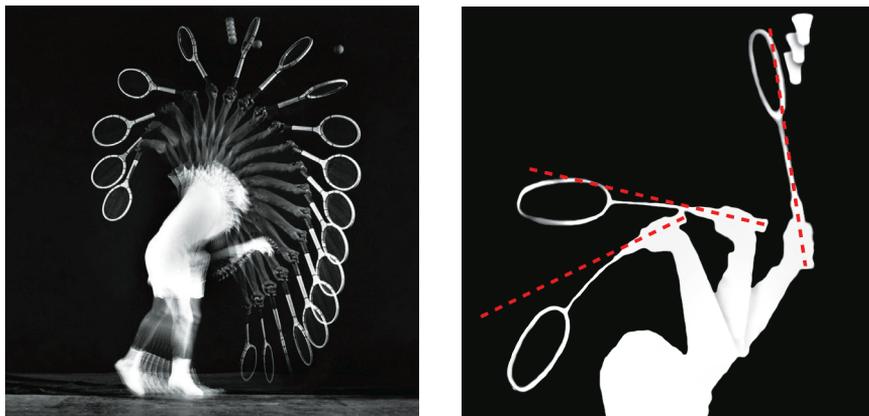


Но за счёт спортивного снаряда в руке спортсмена можно увеличить и «эффективную длину руки» L . И чем длиннее эта «дополнительная рука», тем быстрее летит мяч. В силу этого минимальная скорость мячика среди видов спорта, в которых удар выполняется специальным снарядом, достигается в настольном теннисе, где ракетка самая короткая.

Ещё один фактор, за счёт которого можно дополнительно увеличить скорость мяча, — упругость ракетки. При замахе гибкая ракетка запасает упругую энергию, отдавая её мячу в момент удара. Поэтому из всех видов спорта максимальная скорость

достигается в бадминтоне. Сравним хронофотографии удара сверху (так называемого «смеша») в теннисе и в бадминтоне (рис. 1.6).

Рис. 1.6
Хронофотография удара в теннисе и в бадминтоне



Распрямляясь после глубокого прогиба, бадминтонная ракетка к моменту удара приобретает значительную дополнительную угловую скорость по отношению к скорости руки игрока. Использование дополнительной упругой энергии позволяет достичь почти двукратного преимущества в максимальной скорости полёта волана по сравнению с теннисным мячом.

Как мы увидим дальше, траектория полёта мяча во многом определяется его вращением. Мячу, как и бильярдному шару, можно придать вращение вокруг любой оси, выполнив, например, удар с некоторым отклонением направления вектора из точки удара в центр мяча от вектора направления удара. Механике игры на бильярде посвящена достаточно обширная литература, мы же поговорим об ударах, смещённых относительно центра мяча, в главе про футбол. Вращение может также возникать в процессе отскока мяча от поверхности с заметным коэффициентом трения или, что то же самое, в результате удара клюшкой с наклонной поверхностью, на чём мы остановимся

