

Биомеханическое определение общего центра тяжести человека

Описывать положение тела человека можно разными способами. Изложим один из наиболее удобных, разработанный В. Т. Назаровым (1974) и опирающийся на работы Г. В. Коренева (1964) по механике управляемого тела. Положение тела человека в пространстве описывается в этом случае его местом, ориентацией и позой.

Место тела характеризует, в какой части пространства (где именно – например, в какой части стадиона, комнаты) находится в данный момент человек. Чтобы определить место тела, достаточно указать три координаты какой-либо точки тела в неподвижной системе координат. В качестве такой точки обычно удобно выбирать общий центр масс тела (ОЦМ), связывая с ним начало другой, подвижной системы координат, оси которой ориентированы так же, как и оси неподвижной системы.

Ориентация тела характеризует его поворот относительно неподвижной системы координат (вверх головой, вниз головой, горизонтально и т. п.). Поза тела характеризует взаимное расположение звеньев тела относительно друг друга. Определение места тела обычно не связано с большими трудностями. Определение ориентации тела – задача гораздо более трудная, особенно при сложных позах. Объясняется это тем, что с точки зрения механики тело человека является телом переменной конфигурации (В. Т. Назаров, 1974). Для таких тел понятие об их ориентации в пространстве не является строгим.

Вспомним, как определяются основные плоскости и оси человеческого тела (см., например, В. В. Бунак, 1941) (рис. 1).

Основные плоскости тела ориентируются в системе трех взаимно перпендикулярных осей: вертикальной и двух горизонтальных – поперечной и глубинной, или передне-задней.

Вертикальная плоскость, проходящая через переднюю срединную и позвоночную линии, а также всякая плоскость, параллельная ей, называются сагиттальными. Они разделяют тело на правую и левую части.

Вертикальная плоскость, проходящая перпендикулярно к сагиттальной, а также всякая плоскость, параллельная ей, называются фронтальными. Они разделяют тело на переднюю и заднюю части.

Горизонтальные плоскости проходят перпендикулярно по отношению к этим двум плоскостям и называются трансверсальными (поперечными). Они разделяют тело на верхнюю и нижнюю части.

К сожалению, основные анатомические плоскости и оси мало пригодны для описания многих движений человека. Проблема здесь состоит в том, что с телом человека надо каким-то образом связать систему координат так, чтобы изменение ориентации этой системы отражало изменение ориентации тела.

М. С. Лукин (1964) предложил с этой целью определять продольную ось тела следующим образом. Тело человека (в стойке руки вверх) делится горизонтальной плоскостью на две равные по весу половины. Линия, соединяющая центры масс верхней и нижней половины тела (и проходящая через ОЦМ), образует продольную ось тела (OY). Другие две оси (OX и OZ) должны быть

перпендикулярны ей и начинаться в ОЦМ. Передне-заднюю ось направляют параллельно плоскости симметрии таза, а поперечную – перпендикулярно ей.

В качестве начала систем координат, связанных с телом, не всегда удобно брать центр масс тела: его положение довольно трудно определить, при изменении позы ОЦМ смещается и может даже выйти за пределы тела. Поэтому в качестве фиксированных антропометрических ориентиров, с которыми удобно связывать начало системы координат, разными авторами предлагались:

а) выход крестцового канала (между крестцовыми рогами), который легко пальпируется. Так как крестец является жестким образованием, система координат,

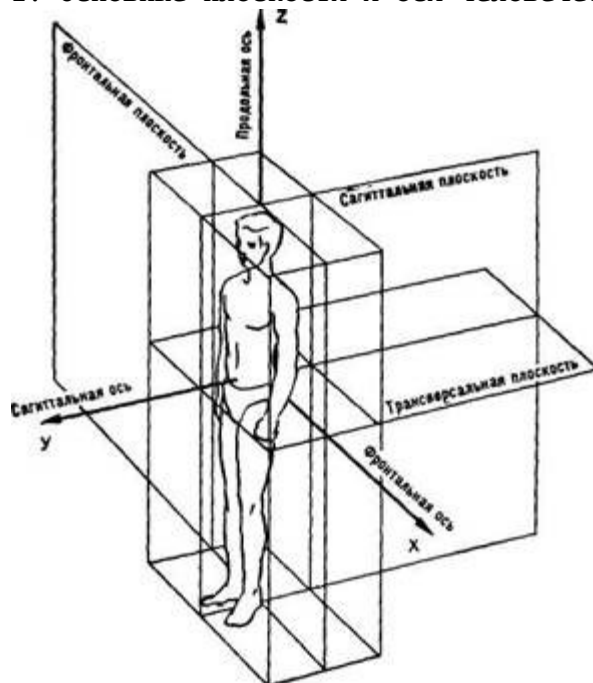
начинающаяся в этой точке, хорошо ориентируется: вертикальная ось OY направлена вверх по крестцу, фронтальная OX – влево, сагиттальная ось OZ – вперед (Panjabietal., 1974);

б) вершина остистого отростка пятого поясничного позвонка (А. Н. Лапутин, 1976) – точка, весьма близко расположенная к центру масс тела человека, стоящего

в обычной стойке.

Для определения ориентации тела с ним надо связать две системы координат, имеющих начало в одной точке. Оси одной из них остаются параллельными неподвижной системе координат (по отношению к которой определяется место тела); оси второй – связаны с телом. Ориентацию тела в этом случае характеризуют три Эйлеровых угла, с помощью которой можно перейти от одной системы координат к другой.

Рис 1. Основные плоскости и оси человеческого тела.



Инерционные характеристики раскрывают, каковы особенности тела человека и движимых им тел в их взаимодействиях. От инерционных характеристик зависит сохранение и изменение скорости. Это масса, момент инерции, обычно непосредственно не регистрируются. Определяются данные, по которым рассчитывают эти характеристики.

Масса тела (m) определяется взвешиванием. Зная по весу тела его силу тяжести (G) и ускорение свободного падения тела (g),

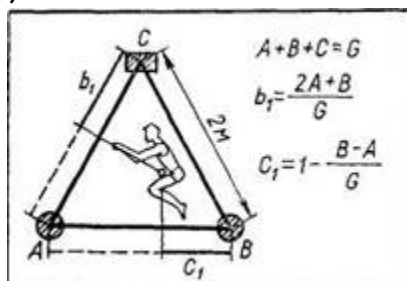
G определяют массу:

$$m = G/g.$$

Распределение масс в теле в известной мере характеризуется положением его общего центра тяжести (ОЦТ). Применяют опытное (экспериментальное) определение положения ОЦТ и расчетное.

Один из наиболее точных опытных методов – взвешивание человека на треугольной платформе (рис.2) в заданной позе.

Рис. 2. Определение положения ОЦТ тела человека взвешиванием на платформе (по Г. Хохмуту)



Необходимую позу устанавливают двумя способами. При первом способе позу срисовывают с кинокадра, увеличивая ее до натурального размера. На этот рисунок, находящийся на платформе, ложится испытуемый, принимая позу, соответствующую нанесенному контуру. При втором способе на кинокадре измеряют углы в крупных суставах тела (плечевые, локтевые, тазобедренные, коленные, голеностопные) и, используя угломеры, придают испытуемому на платформе требуемую позу.

Опытное определение выполняют и на моделях. Модель Абалакова – фигурка

человека, построенная с соблюдением средних пропорций тела (в 0,1 размера тела и 0,001 веса) фигурка укладывается в заданной позе на лист бумаги с контурами позы (рис. 3, а) Лист с моделью передвигают по свободно качающейся на опоре *O* платформе, пока ОЦТ модели не совпадет с точкой подвеса платформы Нажимом снизу на иглу в центре платформы прокалывают лист бумаги в точке расположения ОЦТ.

Можно также применить шарнирную модель *O. Фишера*, которая позволяет определить положение ОЦТ в передне-задней плоскости (рис 3, б)

Масса – это мера инертности тела при поступательном движении. Она измеряется отношением приложенной силы к вызываемому ею ускорению:

$$m=F/a ; [m]= M$$

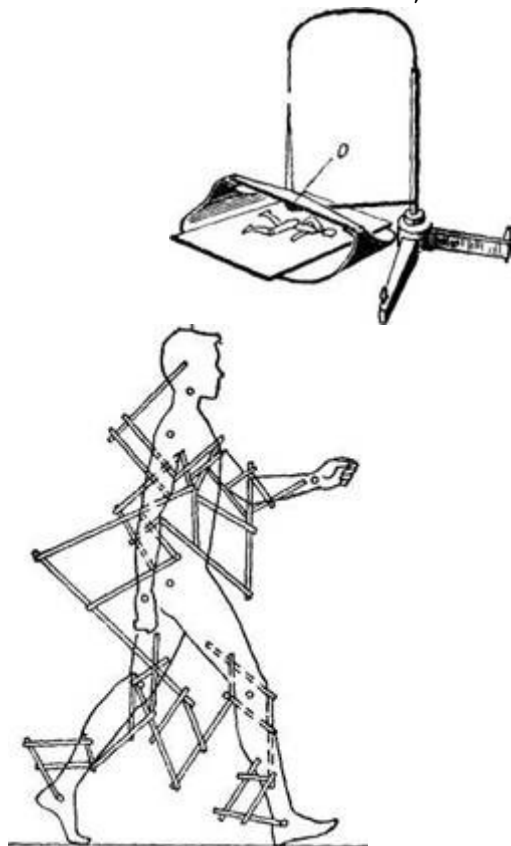
Измерение массы здесь основано на втором законе Ньютона: *Изменение движения пропорционально извне действующей силе и происходит по тому направлению, по которому эта сила приложена.*

Масса тела характеризует, как именно приложенная сила может изменить движение тела. Одна и та же сила вызовет большее ускорение у тела с меньшей массой, чем у тела с большей массой.

Масса тела человека во время движения не изменяется. Так как она служит мерой инерции, то не следует говорить: «набрать инерцию», «погасить инерцию». Увеличивают и уменьшают не массу (как меру инерции), а кинетическую энергию (зависящую от скорости тела).

Для анализа движений часто приходится учитывать не только величину массы, но и ее распределение в теле. В известной степени это указывает на местоположение центра масс тела. Эта точка совпадает с центром тяжести того же тела (центр масс совпадает с центром инерции как точкой приложения параллельных сил инерции всех точек тела).

Рис. 3. Определение положения ОЦТ тела человека: а – по модели В. М. Абалакова, б – по модели *O. Фишера*



Момент инерции – это мера инертности тела при вращательном движении.

Момент

инерции тела равен отношению момента силы относительно данной оси к вызываемому им угловому ускорению:

$$I = Mz(F) / \varepsilon = \sum m r^2; [I] = ML^2$$

Момент инерции тела относительно данной оси численно равен сумме произведений масс всех его частиц и квадратов расстояний каждой частицы до этой оси. Отсюда видно, что момент инерции тела больше, когда его частицы дальше от оси вращения. В таком случае тот же момент силы $M_z(F)$ вызовет меньшее угловое ускорение (ε). Инерционное

сопротивление быстро увеличивается с отдалением частей тела от оси вращения.

Обратим внимание на то, что основное уравнение динамики в принципе одинаково для поступательного и вращательного движения. В левой его части причина изменения движения – сила (F) или момент силы $M_r(F)$; в правой части сначала мера инертности – масса (m) или момент инерции (I), и далее мера изменения скорости – ускорение линейное (a) или угловое (ε).

Поступательное движение	Вращательное движение
$F = ma.$	$M_z(F) = I \varepsilon;$
$F r = m R^2 \varepsilon.$	

Заметим также, что действие силы во вращательном движении зависит от того, как

далеко проходит линия ее действия от оси вращения (r).

Инертное сопротивление в этом случае зависит также от того, как частицы тела (их

массы) распределены относительно оси вращения (R).

Величина R называется радиусом инерции. Она показывает, насколько удалены массы от оси вращения. Если расположить все частицы тела на одинаковом

расстоянии от оси, получится полый цилиндр. Радиус такого цилиндра, момент инерции которого равен моменту инерции изучаемого тела, и есть радиус инерции (R). Он позволяет сравнивать различные распределения массы тела относительно разных осей вращения.

Понятие о моменте инерции очень важно для понимания движений, хотя точное количественное определение этой величины в конкретных случаях пока затруднено.

Тело человека – это система подвижно соединенных звеньев. На каждое звено тела

человека действует сила тяжести звена, направленная вертикально вниз. Если силы

тяжести звеньев обозначить соответственно G_1, G_2, \dots, G_n ,

то равнодействующая этих параллельных сил $G_{\text{тела}}$ и модуль (величина) этой силы, равна:

$$G_{\text{тела}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n = \sum_{i=1}^n G_i.$$

При любом повороте тела силы остаются приложенными в одних и тех же точках звеньев и сохраняют свое вертикальное направление, оставаясь параллельными друг другу. Следовательно, и равнодействующая сил тяжести звеньев тела будет при любых положениях тела проходить через одну и ту же точку тела, неминуемо с ним связанную, являющуюся центром параллельных сил тяжести звеньев.

Точка, через которую проходит линия действия равнодействующей элементарных сил тяжести при любом повороте тела в пространстве, являясь центром параллельных сил тяжести, называется общим центром тяжести (ОЦТ) твердого тела.

Так как тело человека не является неизменным твердым телом, а представляет собой

систему подвижных звеньев, то положение ОЦТ будет определяться главным образом

позой тела человека (т.е. взаимным относительным положением звеньев тела) и изменяться с изменением позы.

Знание положения ОЦТ человека важно для биомеханического анализа и для решения многих самостоятельных задач механики спортивных движений. Часто по движению ОЦТ мы судим о движении человека в целом, как бы оцениваем результат движения. По характеристикам движения ОЦТ (траектории, скорости, ускорению) можно судить о технике выполнения движения.

Степень напряжения тех или иных мышечных групп в статическом положении зависит от распределения массы тела (от конструктивных особенностей), и этим определяются двигательные возможности человека.

Говоря об ОЦТ тела человека, следует иметь в виду не геометрическую точку, а некоторую область пространства, в которой эта точка перемещается. Это перемещение обусловлено процессами дыхания, кровообращения, пищеварения, мышечного тонуса и т.д., т.е. процессами, приводящими к постоянному смещению ОЦТ тела человека. Ориентировочно можно считать, что диаметр сферы, внутри которой происходит перемещение ОЦТ, в спокойном состоянии, составляет 10-20 мм. В процессе движения смещение ОЦТ может значительно увеличиваться и этим оказывать влияние на технику выполнения упражнений.

На каждое звено и на все тело человека постоянно действуют силы тяжести, вызванные притяжением и вращением Земли.

Когда тело покоится на опоре (или подвешено), сила тяжести, приложенная к телу, прижимает его к опоре (или отрывает от подвеса). Это действие тела на опору (верхнюю или нижнюю) измеряется весом тела.

Вес тела (статический) – это мера его воздействия в покое на покоящуюся же опору (подвес), препятствующую его падению. Он равен произведению массы тела

m на ускорение свободного падения g .

$$P = m \times g ; \quad [P] - \text{Н (ньютон)}$$

Значит, сила тяжести и вес тела – не одна и та же сила. Вес тела человека приложен к опоре, а сила тяжести приложена к телу человека (центру тяжести). Опытным путем (О. Фишер, Н.А. Бернштейн) были определены средние данные о весе звеньев тела и положении их центров тяжести. Если принять вес тела за 100%, то вес каждого звена может быть выражен в относительных единицах (%). При выполнении расчетов не обязательно знать ни вес всего тела, ни каждого его звена в абсолютных единицах.

Центры тяжести звеньев определены или по анатомическим ориентирам (голова, кисть), или по относительному расстоянию ЦТ от проксимального сустава (радиус центра тяжести – часть всей длины конечностей), или по пропорции (туловище, стопа).

При учебных расчетах принято считать относительный вес головы равным 7% веса всего тела, туловища – 43%, плеча – 3%, предплечья – 2%, кисти – 1%, бедра – 12%, голени – 5%, стопы – 2%.

Центр тяжести звена определяют по расстоянию от него до оси проксимального сустава – по радиусу центра тяжести. Его выражают относительно длины всего звена, принятой за единицу, считая от проксимального сочленения. Для бедра он составляет приблизительно 0,44; для голени – 0,42; для плеча – 0,47; для предплечья – 0,42; для туловища – 0,44 (отмеряют расстояние от поперечной оси плечевых суставов до оси тазобедренных суставов). Центр тяжести головы расположен в области турецкого седла клиновидной кости (проекция спереди на поверхность головы – между бровями, сбоку – на 3-3,5 см выше наружного слухового прохода). Центр тяжести кисти расположен в области головки третьей пястной кости, центр тяжести стопы – на прямой, соединяющей пяточный бугор пяточной кости с концом второго пальца, на расстоянии 0,44 от первой точки (рис. 4, а).

Зная вес звеньев и радиусы центров их тяжести, можно приблизительно определить положение ОЦТ всего тела.

Общий центр тяжести всего тела – это воображаемая точка, к которой приложена равнодействующая сил тяжести всех звеньев тела. При основной стойке он расположен в области малого таза, впереди крестца (по М.Ф. Иваницкому). Положение ОЦТ тела надо знать при определении равновесия человека на опоре (или

в подвесе), в водной среде, в покое, а также под воздействием потока воздуха или воды. Для определения условий равновесия тела при покое или движении в среде важно узнать положение двух точек: центра объема и центра поверхности тела.

Центр объема (ЦО) тела человека – это точка приложения выталкивающей силы при полном погружении тела в воду. Он совпадает с центром тяжести вытесненной воды в форме погруженного тела. Так как плотность тела человека неодинакова, ЦО обычно на несколько сантиметров ближе к голове (при выпрямленном положении тела), чем ОЦТ. Значит, погруженное в воду тело человека в выпрямленном положении будет поворачиваться вокруг поперечной оси ногами

вниз.

Центр поверхности (ЦП) тела человека – это при данной позе тела и его ориентации относительно потока (воды или воздуха) точка приложения равнодействующей напора среды. Сила действия среды, будучи расположена по ту или иную сторону от ОЦТ человека, обуславливает соответствующий поворот тела. Момент инерции звена тела дает представление о величине массы звена и ее распределении относительно заданной оси. Эта общая характеристика не отражает,

насколько она зависит от величины масс и насколько от распределения материальных частиц относительно заданной оси. Момент инерции служит лишь мерой

инертности. Относительно разных осей момент инерции звена различен. Обычно нужно знать момент инерции звена относительно поперечной оси проксимального сустава. Момент инерции для неоднородных тел, не имеющих правильной геометрической формы, определяют только опытным путем. Приблизительно моменты инерции длинных звеньев конечностей равны $0,3 ml^2$ (где m – масса звена и l – длина звена). Радиусы инерции относительно поперечной оси проксимального сустава приблизительно равны для плеча 0,55, для предплечья – 0,50, для бедра – 0,53 и для голени – 0,50 всей длины звена. Радиусы инерции существенно больше радиусов центров тяжести, поэтому при расчетах нельзя считать их равными.

Момент инерции тела человека относительно заданной оси определяется как сумма моментов инерции всех звеньев тела относительно той же оси. Наименьший момент инерции выпрямленного тела человека – момент инерции относительно продольной оси тела, проходящей через его ОЦТ (рис. 4, б). Направленное изменение момента инерции широко используется при управлении вращательными движениями тела.

Рис. 4. Геометрия масс тела человека: а – центры тяжести и относительные веса звеньев (по О. Фишеру и Н. А. Бернштейну); б – моменты инерции тела относительно разных осей

