

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	7
Предисловие	10
I. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ БИОМЕХАНИКИ	12
Задачи	12
Введение	14
Глава 1. КИНЕМАТИКА: ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ	33
1.1. Типы движений	33
1.2. Плоскость движения	37
1.3. Направление движения	39
1.4. Амплитуда и величина движения	40
Глава 2. КИНЕТИКА: АНАЛИЗ СИЛ	43
2.1. Определение силы. Векторы и обозначения сил	43
2.2. Сила тяжести	47
2.2.1. Сегментарные центры тяжести	49
2.2.2. Центр тяжести человеческого тела	51
2.2.3. Устойчивость и центр тяжести	53
2.2.4. Перемещение центра тяжести	56
2.3. Силы реакции	58
2.3.1. Закон реакции Ньютона	58
2.4. Равновесие	61
2.4.1. Закон инерции Ньютона	61
2.4.2. Определение равновесия предмета	62
2.5. Предметы в движении	68
2.5.1. Закон ускорения Ньютона	69
2.5.2. Расхождение сустава в линейной системе сил	74
2.6. Сила трения	79
2.7. Системы пересекающихся сил	82
2.7.1. Сложение сил	83
2.7.2. Линии действия мышц	84
2.8. Системы параллельных сил	89
2.8.1. Рычаги первого, второго, третьего рода. Вращающий момент	90
2.8.2. Сложение сил	96
2.8.3. Механическое преимущество и его компромиссы	101
2.9. Механическое понятие «работа»	105
2.10. Момент силы плеча рычага	107

2.10.1. Плечо момента мышечной силы	108
2.10.2. Плечо момента силы тяжести	112
2.10.3. Анатомические блоки	114
2.11. Компоненты силы	116
2.12. Рычаги равновесия	125
2.12.1. Ротационное и линейное равновесие	125
2.12.2. Другие эффекты ротационных и поступательных сил	128
II. ПОСТУРОЛОГИЯ: ПОЗА, ОСАНКА	137
Задачи	137
Введение	138
Глава 3. СТАТИЧЕСКАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ОСАНКА	141
3.1. Контроль осанки	142
Глава 4. КИНЕМАТИКА И КИНЕТИКА ОСАНКИ	152
4.1. Сила инерции и сила тяжести	152
4.2. Силы реакции опоры	153
4.3. Совпадающие линии действия	155
4.4. Сагиттальная плоскость	156
Глава 5. ОПТИМАЛЬНАЯ, ИЛИ ИДЕАЛЬНАЯ, ОСАНКА И ЕЕ АНАЛИЗ	159
5.1. Вид сбоку — оптимальное выравнивание в сагиттальной плоскости	160
5.2. Вид сбоку — отклонения от оптимального выравнивания	168
5.3. Вид спереди и сзади — оптимальное выравнивание	178
5.4. Вид спереди и сзади — отклонения от оптимального выравнивания	181
Глава 6. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ОСАНКУ	204
III. БИОМЕХАНИКА ХОДЬБЫ	212
Задачи	212
Введение	213
Глава 7. ОБЩИЕ ПРИЗНАКИ И НАЧАЛО ХОДЬБЫ	217
Глава 8. КИНЕМАТИКА ХОДЬБЫ	220
8.1. Фазы цикла ходьбы	220
8.1.1. Опорная фаза	223
8.1.2. Фаза переноса	226
8.2. Переменные времени и расстояния	229
8.3. Движения суставов	233
8.4. Детерминанты ходьбы	237

Глава 9. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ	243
9.1. Механическая энергия	244
9.2. Положительная и отрицательная работа	245
Глава 10. КИНЕТИКА ХОДЬБЫ	248
10.1. Внешние и внутренние силы	248
10.2. Анализ в сагиттальной плоскости	250
10.3. Анализ во фронтальной плоскости	255
Глава 11. КИНЕМАТИКА И КИНЕТИКА ТУЛОВИЩА И ВЕРХНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ	272
Глава 12. ХОДЬБА ПО ЛЕСТНИЦЕ И БЕГ	276
Глава 13. АНАЛИЗ ХОДЬБЫ: ОТКЛОНЕНИЯ ОТ НОРМЫ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЧИН	286
13.1. Возраст	286
13.2. Пол	292
13.3. Вспомогательные устройства	293
13.4. Заболевания	294
13.5. Мышечная слабость или паралич	295
13.6. Асимметрии нижних конечностей	297
13.7. Травмы и нарушения параллельности	301
IV. СТРУКТУРА И ФУНКЦИЯ СУСТАВА	306
Задачи	306
Введение	307
Глава 14. МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СУСТАВАХ ЧЕЛОВЕКА	311
14.1. Строение соединительной ткани	311
14.2. Специфические структуры соединительной ткани	318
14.2.1. Связки. Сухожилия	318
14.2.2. Сумки. Хрящи	321
14.2.3. Кость	325
Глава 15. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ	330
15.1. Вязкоупругость, временные характеристики, свойства быстрого действия	331
15.2. Механическое поведение	334
15.2.1. Напряжение и усилие	334
15.2.2. Кривые «нагрузка-деформация» и «напряжение-деформация»	337
15.3. Свойства специфических тканей	342

Глава 16. АРХИТЕКТУРА СУСТАВА ЧЕЛОВЕКА	347
16.1. Синартрозы	348
16.2. Диартрозы.....	352
16.2.1. Подклассификации диартроидальных суставов.....	361
Глава 17. ФУНКЦИЯ СУСТАВА	366
17.1. Кинематические цепи.....	366
Глава 18. ДВИЖЕНИЕ В СУСТАВЕ	369
18.1. Артрокинематика.....	369
18.2. Остеокинематика.....	374
Глава 19. ОБЩИЕ ЭФФЕКТЫ ЗАБОЛЕВАНИЙ, ТРАВМ И ИММОБИЛИЗАЦИИ	376
V. СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ МЫШЦ	384
Задачи	384
Введение.....	385
Глава 20. ЭЛЕМЕНТЫ СТРОЕНИЯ МЫШЦ	400
20.1. Состав мышечного волокна	400
20.2. Единица сокращения.....	404
20.3. Единица движения.....	407
20.4. Структура мышцы	412
20.4.1. Типы волокон.....	412
20.4.2. Архитектура мышц: размер, организация и длина	415
20.5. Соединительные ткани мышц.....	418
Глава 21. ФУНКЦИИ МЫШЦ	423
21.1. Напряжение мышц	423
21.1.1. Изометрическое отношение «длина–напряжение».....	424
21.1.2. Отношение «сила–скорость»	429
21.1.3. Типы мышечного действия	431
21.1.4. Угловая скорость и крутящий момент.....	435
21.1.5. Мышечная деятельность в управляемых условиях.....	439
21.2. Классификация мышц.....	444
21.3. Факторы, влияющие на мышечную функцию	450
21.3.1. Типы суставов и расположение мышечных прикреплений	450
21.3.2. Количество суставов	451
21.3.3. Пассивная недостаточность	453
21.3.4. Сенсорные рецепторы	456
21.4. Эффекты иммобилизации, травм и старения.....	458
Литература.....	466

действия, которое параллельные силы оказывают на жесткие рычаги скелета, нам следует вспомнить принципы действия рычага.

2.8.1. Рычаги первого, второго, третьего рода. Вращающий момент

Рычаги первого рода. Система рычагов первого рода возникает тогда, когда две параллельные силы (или две параллельные равнодействующие) действуют по сторонам от оси, вызывая (или пытаясь вызвать) вращение рычага в противоположных направлениях. Как правило, в качестве примера рычага первого рода, на который воздействуют силы, приводятся детские качели (рис. 2.31, а). На рычаг, или качели, действуют четыре силы (поскольку в контакте с ним находятся четыре вещи). Это контакты человека А, человека В, клина и силы тяжести. На рис. 2.31, б показано схематическое изображение рычага и сил, действующих на него. Силы «клин–качели» (КК) и «сила тяжести–качели» (СТ) действуют на ЦТ качелей и входят в линейную систему сил. Эти силы не удалены друг от друга (они составляют линейную систему сил) или не удалены от оси (клино). Мы будем при движении их игнорировать и сосредоточим внимание на векторах А и В. На рис. 2.32 показаны качели и те же силы, но только они обозначены не так, как на рис. 2.31, б.

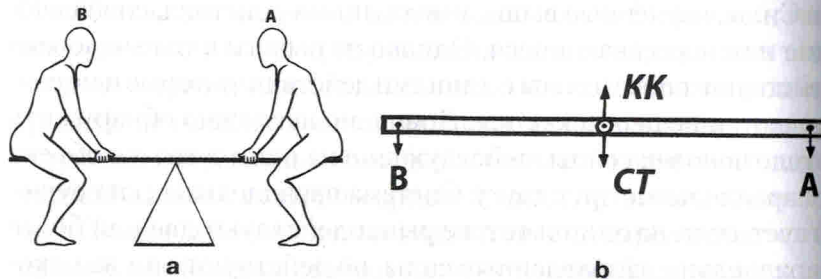


Рис. 2.31. Рычаг первого рода: детские качели (а). В контакте с рычагом находятся люди А и В, сила тяжести (СТ) и клин (КК), который служит осью (б)

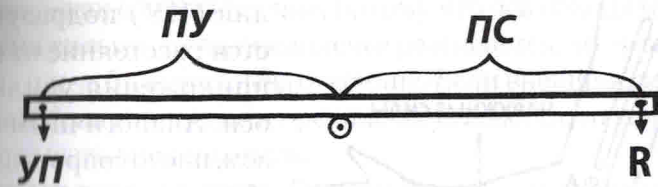


Рис. 2.32. Система рычага первого рода: УП — усилие, действующее на расстоянии ПУ (плечо усилия) от оси; R — сопротивление, действующее на расстоянии ПС (плечо сопротивления) от оси

Сила В называется усилием (УП). Она определяется как сила, вызывающая вращение рычага. Сила А обозначается как сила сопротивления (R). Сила сопротивления — это сила, которая препятствует вращению рычага (действует в направлении, противоположном вращению). Понятно, это предполагает, что вращение рычага вызывается человеком В, т.е. качели идут вниз со стороны человека В. Если качели находятся в равновесии, то выбор силы, которую обозначают как усилие и которую обозначают как сопротивление, может быть произвольным. Если равновесия нет (рычаг вращается), то вращение рычага всегда происходит в направлении действия усилия или, если формулировать точнее, **усилие** — это сила, осуществляющая тягу в направлении движения.

Плечо рычага (ПР) в системе параллельных сил — это расстояние от оси до точки приложения силы к рычагу. Термин «плечо рычага» используется в этой книге для того, чтобы описать, насколько далеко от оси действует сила; к собственно длине рычага он отношения не имеет. Под плечом уси-

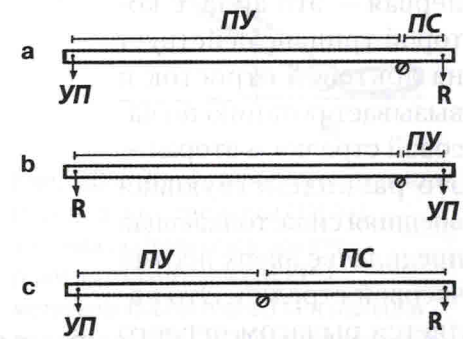


Рис. 2.33. В системе рычага первого рода ПУ может быть: а — больше, чем R; б — меньше ПС; с — равно ПС



Рис. 2.34. Рычаг первого рода в теле человека. Сила трехглавой мышцы плеча, действующая на локтевой отросток локтевой кости, и внешняя сила, действующая на локтевую кость, разделены осью (А)

между усилием и сопротивлением, при этом классификация рычага не изменяется.

В теле человека довольно немного рычагов первого рода. На рис. 2.34 показаны две параллельные силы, действующие на рычаг предплечья: первая — это сила, с которой трицепс действует на локтевой отросток и вызывает ротацию по часовой стрелке, а вторая — это равнодействующая внешняя сила, толкающая предплечье вверх против часовой стрелки. Это является рычагом первого рода, независимо от того, какую из сил мы будем обозначать как усилие,

лиа (ПУ) подразумевается расстояние от места приложения усилия до оси. Аналогичным образом, плечо сопротивления (ПС) — это расстояние от точки приложения силы сопротивления до оси (см. рис. 2.32). В рычаге первого рода ПУ может быть больше, меньше, или равно ПС (рис. 2.33), поскольку ось может находиться в любом месте

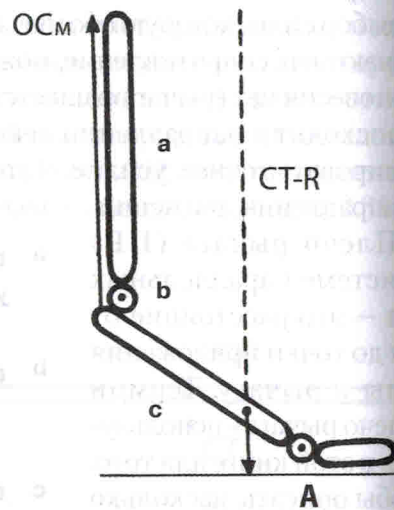


Рис. 2.35. Система рычага второго рода. Плечо усилия (ПУ) всегда больше, чем плечо сопротивления (ПС)

или какую — как сопротивление, потому что ось находится между двумя силами. Если предплечье разгибается, то трехглавая мышца плеча будет оказывать усилие. Если внешняя сила преодолевает силу трицепса и предплечье сгибается, то усилие будет оказывать внешняя сила.

Рычаги второго рода. Рычаги второго рода возникают, когда две параллельные силы (или параллельные равнодействующие) действуют на некотором расстоянии от оси, причем сила сопротивления действует на точку, расположенную на оси ближе, чем точка приложения усилия (рис. 2.35). В рычаге второго рода ПУ всегда длиннее, чем ПС. Рычаги второго рода в теле человека часто наблюдаются, когда усилием является сила тяжести, а сопротивление оказываются мышцами. Есть также примеры рычагов второго рода, в которых усилие развивается мышцами, но при этом дистальный сегмент, к которому прикрепляется мышца, несет вес тела. Результатом становится движение проксимального, а не дистального рычага. На рис. 2.36 показано действие икроножного трицепса. Суперпозиционный вес тела, действующий на стопу через ЛСТ, является сопротивлением (R). Поскольку мышцы совершают усилие, а вес тела оказывает

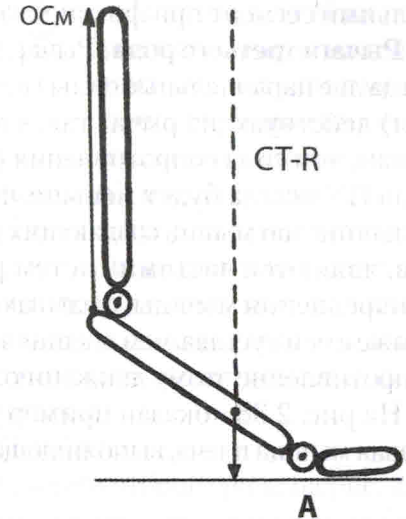


Рис. 2.36. При активном сокращении икроножного трицепса (ОСм) вес тела поднимается вокруг плюснефаланговой (МТР — метатарзофаланговой) оси пальцев ног. Сила ОСм (УП) и сила тяжести (R) действуют как рычаг второго рода; осью (А) при этом являются плюснефаланговые суставы

сопротивление, образуется рычаг второго рода. Примером рычага второго рода в теле человека, при котором усилие оказывают мышцы и вызывают движение длинного плеча с преодолением сопротивления силы тяжести, в человеческом теле не обнаруживается.

В таком случае точка приложения действия мышцы должна находиться дальше от оси, чем смещенный ЦТ конечности. Мышцы с прикреплениями, которые удовлетворяли бы этому требованию, в организме нет. Соответственно, рычаги второго рода встречаются в теле либо при эксцентрическом сокращении мышцы против действующей внешней силы, либо при таких обстоятельствах, когда мышца воздействует на проксимальный сегмент при фиксированном дистальном сегменте.

Рычаги третьего рода. Рычаг третьего рода возникает тогда, когда две параллельные силы (или компоненты параллельных сил) действуют на рычаг так, что усилие расположено к оси ближе, чем сила сопротивления (рис. 2.37). В рычаге третьего рода ПУ всегда будет меньше, чем ПС. В человеческом теле большинство мышц, создающих ротацию дистальных сегментов, являются частями систем рычага третьего рода. Точка прикрепления мышцы, вызывающей движение, почти всегда ближе к оси сустава, чем внешняя сила, которая обычно создает сопротивление этому движению.

На рис. 2.38 показан пример рычага третьего рода — двуглавая мышца плеча, выполняющая сгибание сегмента предплечья/кисти с преодолением

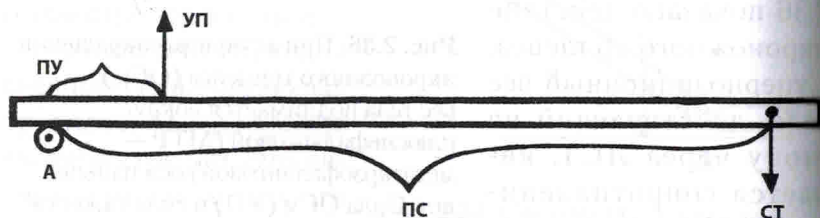


Рис. 2.37. Рычаг третьего рода. Плечо усилия (ПУ) всегда меньше, чем плечо сопротивления (ПС)

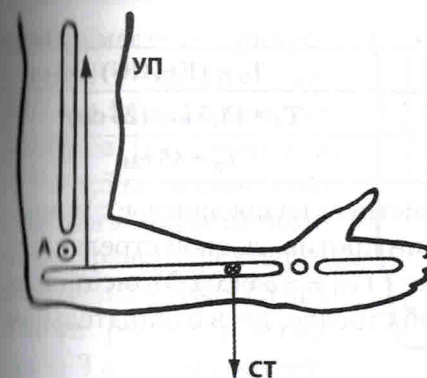


Рис. 2.38. Рычаг третьего рода в человеческом теле. Вектор усилия бицепса (УП) находится ближе к оси (А), чем точка приложения силы тяжести (СТ)

и остью. Способность любой силы вызывать вращение рычага известна под названием «вращающий момент», или «момент силы». Вращающий момент (Т) — это произведение величины прикладываемой силы (F) и расстояния (d) от точки действия силы до оси вращения. Расстояние (d) — кратчайшая дистанция между линией действия силы и осью рычага; это длина линии, проведенной перпендикулярно линии действия силы и пересекающая ось. Соответственно:

$$T = (F)(\perp d).$$

В схематическом примере рычага второго рода на рис. 2.35 d для усилия и сопротивления соответствуют плечам рычага ПУ и ПС соответственно. В этом примере ПУ и ПС представляют собой кратчайшее расстояние между силами и осями.

Если бы на рис. 2.38 были даны гипотетические размерности и расстояния, можно было бы определить абсолютный момент силы, действующий на рычаг. Допустим, двуглавая мышца плеча (УП) сокращается с силой 54 кг, действующей на расстоянии 2,5 см от оси. Вес сегмента «предплечье/кисть» (R) составляет 4,5 кг и ЦТ сегмента находится в ≈ 25 см (ПС) от оси.

чья/кисти с преодолением силы тяжести. Поскольку сила бицепса обозначена как УП, ротация должна происходить в направлении усилия бицепса. Сила тяжести оказывает сопротивление движению и обозначается как R.

Вращающий момент.

Независимо от класса рычага, вращение сегмента зависит как от величины усилия и сопротивления, так и от расстояния между точкой приложения силы

Глава 4

КИНЕМАТИКА И КИНЕТИКА ОСАНКИ

Паттерны мышечной активности, наблюдаемые как ответ на возмущение, используются для противодействия силам, которые изменяют равновесие тела в положении стоя. В данном разделе рассматриваются действия как внешних, так и внутренних сил на тело и его сегменты, что дает возможность понять, как сохраняются статические положения тела. Внешние силы, которые мы будем рассматривать, следующие: инерция, гравитация и сила реакции опоры (СРО). Внутренние силы связаны с мышечной деятельностью и пассивным натяжением связок, сухожилий, капсул суставов и других мягких тканей. В соответствии с определением равновесия, приведенным в ч. I, чтобы тело находилось в равновесии, внешние и внутренние силы должны быть сбалансированы и сумма всех сил и крутящих моментов, действующих на тело и его сегменты, должна быть равна нулю. Тело старается достичь и сохранить состояние равновесия в положении стоя при помощи минимальных затрат энергии: оно старается удерживать ЦТ тела над ПО, а голову — в таком положении, чтобы взгляд был правильно направлен.

4.1. Сила инерции и сила тяжести

В целом силой инерции в статических позах можно пренебречь, поскольку ускорение или ничтожно мало, или отсутствует вообще, за исключением постуральных колебаний. В положении стоя тело всегда выполняет колебательные движения, называемые постуральными колебаниями, или «колебательным конвертом». Диапазон такого конверта при нормальном положении стоя и расстоянии между стопами около 10–16 см, может быть до 12° в сагиттальной плоскости и до 16° во фронтальной плоскости. Инерционные силы, которые могут воз-

никнуть при этих колебаниях, при анализе сил, действующих в статических положениях, обычно не рассматривают. Однако динамические силы надо учитывать при анализе всех динамических положений тела, таких как ходьба, бег и бег трусцой.

Сила тяжести действует книзу от ЦТ тела. В статическом положении стоя вертикальная проекция ЦТ тела (ЛСТ) находится в пределах ПО, которая обычно является пространством, ограниченным двумя стопами (см. рис. 3.1). В динамических положениях, таких как ходьба и бег, проекция ЛСТ находится за пределами стоп в течение значительного времени, что делает тело неустойчивым во время выполнения всей этой части двигательной задачи. При статическом положении стоя проекция ЛСТ должна находиться в пределах ПО, тогда тело будет в равновесии.

4.2. Силы реакции опоры

В любой момент, когда тело осуществляет контакт с опорой (почвой), опора отталкивает его обратно. Эта сила известна как сила реакции опоры (СРО). СРО является результирующей силой, обычно состоящей из трех компонентов: вертикального и двух горизонтальных силовых компонентов. Одна из двух горизонтальных сил действует в медиальном/латеральном направлении, другая — в переднезаднем направлении. Вектор (результатирующей) силы реакции опоры (ВСРО) в положении стоя по величине равен силе тяжести, но противоположен ей по направлению. ВСРО указывает на величину и направление силы, действующей на стопу. Точкой приложения ВСРО в теле является центр давления (ЦД), который при стойке на одной ноге находится в стопе и между стопами при стойке на двух ногах. Если человек выполняет стойку на руках, ЦД будет находиться между кистями. ЦД, как и ЦТ, является теоретической точкой, в которой, как считается, действует сила, хотя на поверхность тела, находящуюся в контакте с опорой, могут дей-

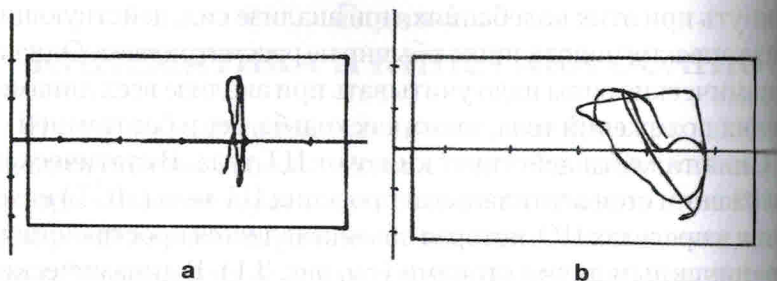


Рис. 4.1. Траектория центра давления при вертикальной осанке: **a** — график движения ЦТ человека, стоящего на тензометрической платформе. Прямоугольник представляет собой контур тензометрической платформы. Траектория показывает нормальный ритмический переднезадний «конверт колебаний» во время удержания положения стоя в течение примерно 30 с; **b** — траектория ЦТ показывает относительно бесконтрольные поструральные колебания

ствовать силы практически по всей контактной поверхности. Траекторию ЦД, которая определяет степень колебательного конверта, можно определить графиком ЦД с равными интервалами. Человек при этом стоит на тензометрической платформе (рис. 4.1).

ВСРО и ЛСТ в положении стоя обладают совпадающими линиями действия. На рис. 2.19 (часть I) ВСРО и ЛСТ являются частью одной и той же системы линейных сил. Во многих динамических состояниях пересечение ЛСТ с опорной поверхностью может не совпадать с точкой приложения ВСРО. Горизонтальное расстояние между точкой на поверхности опоры, где ЛСТ пересекается с опорой, и ЦТ (где действует ВСРО) указывает на величину момента, которому надо противодействовать для того, чтобы сохранить позу и удержать человека от падения.

Технология, требуемая для исследования СРО, ЦД и мышечной активности, дорогостоящая и может быть недоступна среднему исследователю функций человека. Таким образом, далее будет представлен упрощенный метод анализа осанки

и позы при помощи диаграмм, и сопряженного действия ЛСТ и ВСРО, взятого в качестве эталона.

4.3. Совпадающие линии действия

При идеальной вертикальной осанке сегменты тела выровнены так, чтобы крутящие моменты и нагрузки на сегменты

тела были минимизированы и осанку можно поддерживать с минимальными затратами энергии. Совпадающие линии действия, образованные ВСРО и ЛСТ, служат эталонными отметками для анализа действия этих сил на сегменты тела (рис. 4.2). Когда ЛСТ и ВСРО совпадают, как это наблюдается при статическом положении, мы можем оценивать действия в каждом суставе, используя одну или другую. ЛСТ мы будем использовать в оставшейся части главы. Расположение ЛСТ постоянно меняется (соответственно и ЦД) по причине поструральных колебаний. В результате постоянных движений ЛСТ моменты, действующие вокруг суставов, постоянно меняются. Рецепторы в суставах сегментов тела и вокруг них, а также на подошвах распознают эти изменения и передают эту информацию в ЦНС. ЦНС анализирует входные сигналы и в нормальных условиях выдает соответствующий ответ для поддержания поструральной стабильности.

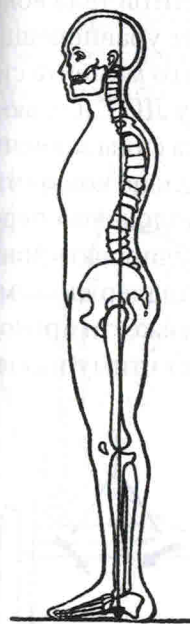


Рис. 4.2. Расположение совпадающих линий действия, образованных вектором силы реакции опоры и линии силы тяжести при оптимальном положении стоя

4.4. Сагиттальная плоскость

Действие сил на сегменты тела в сагиттальной плоскости определяется расположением ЛСТ относительно осей движения сегментов тела. Когда ЛСТ проходит непосредственно через ось сустава, вокруг него не создается гравитационного крутящего момента. Однако если ЛСТ проходит на расстоянии от оси, создается крутящий момент силы тяжести. Этот момент вызывает ротацию суперпозиционных сегментов тела вокруг оси этого сустава, которой противодействует уравнивающий крутящий момент. Величина крутящего момента силы возрастает с увеличением расстояния между ЛСТ и осью сустава. Направление гравитационного момента силы зависит от расположения линии силы тяжести относительно конкретной оси сустава. Если линия силы тяжести расположена спереди от оси сустава, крутящий момент будет стимулировать движение вперед проксимального сегмента тела, поддерживаемого этим суставом (рис. 4.3, а). Если линия силы тяжести проходит сзади от оси сустава, крутящий момент будет стимулировать

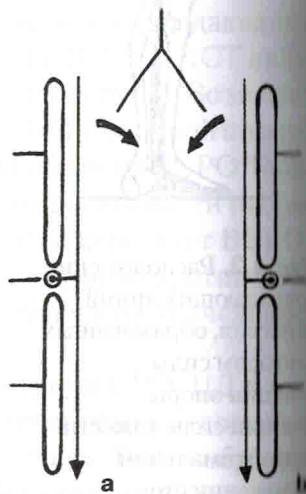


Рис. 4.3. Схематическое представление гравитационных моментов в нижних конечностях человека, стоящего справа от смотрящего. Гравитационный момент сдвигает проксимальный сегмент (бедренную кость):
а — вперед, если ЛСТ проходит спереди от оси сустава; **б** — назад, если ЛСТ проходит сзади от оси сустава

движение проксимального сегмента в заднем направлении (рис. 4.3, б). При анализе осанки или позы гравитационные моменты, создающие движение в сагиттальной плоскости, относятся либо к сгибанию, либо к разгибанию.

ПРИМЕР 1. Если ЛСТ проходит спереди от оси голеностопного сустава, гравитационный момент силы будет направлен на ротацию большой берцовой кости (проксимальный сегмент) в переднем направлении (рис. 4.4). Переднее движение большой берцовой кости на согнутой стопе вызовет тыльное сгибание в голеностопном суставе. Соответственно, момент силы будет называться моментом тыльного сгибания.

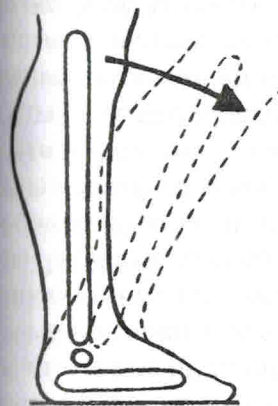


Рис. 4.4. Переднее расположение ЛСТ относительно голеностопного сустава создает момент тыльного сгибания. Стрелка указывает на направление момента тыльного сгибания. Пунктирная линия — на направление, в котором большая берцовая кость будет двигаться, если моменту тыльного сгибания не оказывается противодействие

ПРИМЕР 2. Если ЛСТ проходит спереди от оси вращения коленного сустава, гравитационный момент силы будет вращать бедренную кость (проксимальный сегмент) в переднем направлении (рис. 4.5). Переднее движение бедренной кости вызовет разгибание колена. В этом случае момент силы будет моментом разгибания.

Глава 8 КИНЕМАТИКА ХОДЬБЫ

Ходьба является видом деятельности, весьма сложным для анализа. Соответственно, ее разделяют на определенное число сегментов, что делает возможным идентификацию циклов. Следует заметить также, что анализ ходьбы — весьма особый вид анализа движений в целом. Знание терминологии, применяемой для описания циклов, необходимо для понимания и анализа походки. В целом ходьбу описывают по действиям одной нижней конечности (ее называют эталонной конечностью) от начала и до конца одного цикла ходьбы.

8.1. Фазы цикла ходьбы

Цикл ходьбы включает в себя действия, которые выполняются с момента начального контакта с опорой одной нижней конечности и до момента, в который эта же конечность вновь касается опоры (рис. 8.1). За время одного цикла каждая конечность проходит две фазы: 1) опорную (позиции); 2) переноса (безопорную).

1. **Фаза опоры** начинается в тот момент, когда одна конечность соприкасается с опорой (касание пяткой) и продолжается

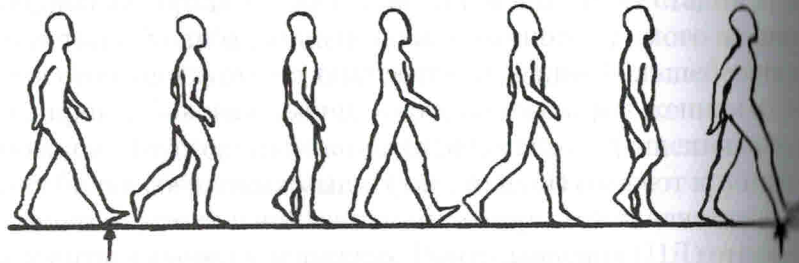


Рис. 8.1. Цикл ходьбы состоит из действий, которые выполняются между начальным контактом эталонной ноги с опорой и повторным контактом той же ноги

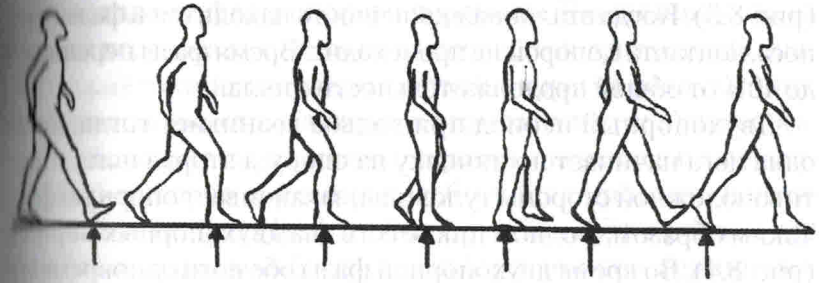


Рис. 8.2. Опорная фаза определяется как период, во время которого любая часть стопы эталонной конечности находится в контакте с опорной поверхностью. Период длится от момента начального контакта стопы эталонной ноги (на диаграмме — правой) до момента, когда контакт с опорой осуществляется только пальцами той же (правой) ноги

до тех пор, пока любая часть стопы касается опоры (момент отрыва пальцев, рис. 8.2). Во время опорной фазы какая-либо часть стопы постоянно находится в контакте с опорной поверхностью. При обычной ходьбе опорная фаза составляет приблизительно 60% общего времени цикла.

2. **Фаза переноса** начинается, как только пальцы одной конечности отрываются от опоры, и заканчивается непосредственно перед постановкой пятки этой же конечности на опору

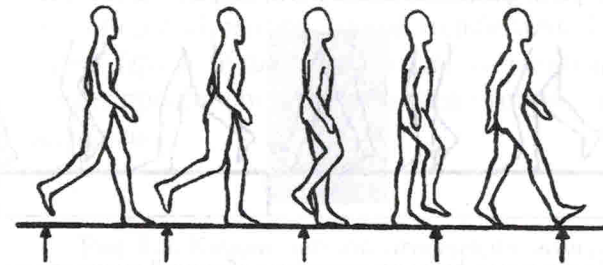


Рис. 8.3. Фаза переноса определяется как период, во время которого стопа эталонной конечности не находится в контакте с поверхностью опоры. Фаза переноса начинается с момента отрыва пальцев ног (большого пальца) эталонной ноги (в данном случае правой) и до последующего ее контакта с опорой

(рис. 8.3). Когда эталонная конечность находится в фазе переноса, контакта с опорой не происходит. Время фазы переноса до 40% от общей продолжительности цикла.

Двухопорный период при ходьбе возникает тогда, когда одна нога начинает постановку на опору, а вторая нога, с противоположной стороны туловища, заканчивает опорную фазу. Таким образом, в одном цикле есть два двухопорных периода (рис. 8.4). Во время двухопорной фазы обе ноги одновременно находятся в контакте с опорой. При нормальной скорости ходьбы время двойной опоры (наложение фаз) составляет около 22% времени цикла (рис. 8.5).

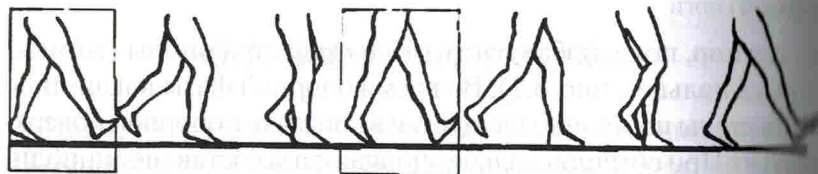


Рис. 8.4. Двойная опора определяется как период, во время которого любые части стоп обеих конечностей одновременно находятся в контакте с поверхностью опоры. Во время одного цикла ходьбы наблюдается два двухопорных периода. Первый из них наблюдается в начале опорной фазы эталонной ноги, второй — в ее конце

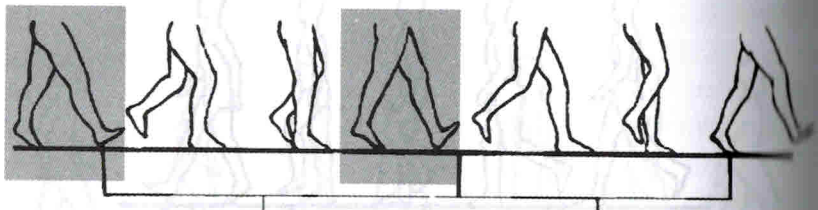


Рис. 8.5. На опорные фазы двух ног при обычной скорости ходьбы накладывается примерно по 11% (от общего времени цикла) перекрытия их двумя периодами двойной опоры. Опорная фаза при обычной ходьбе составляет примерно 60% продолжительности цикла, фаза переноса — 40%. Увеличение или уменьшение скорости изменяет и процентное соотношение продолжительности фаз

Подразделы фазы опоры и переноса. Традиционно фазы опоры и переноса делились на следующие подразделы: 1) опоры, которая состоит из касания пяткой, опоры на полную стопу, середины опоры, отрыва пятки и отрыва пальцев; 2) переноса, который состоит из ускорения, середины переноса и замедления. Лаборатория изучения ходьбы в Медицинском центре *Hancho Los Amigos (RLA)*, «Дом друзей» (ДД), предложила для описания фаз ходьбы другой набор терминов. Терминология ДД может постепенно заменить старые термины.

Читателю следует ознакомиться как с традиционной, так и с новой терминологией, поскольку в литературе могут встречаться оба метода описания ходьбы. Далее будут даны описания сначала в традиционных терминах, затем в терминологии ДД. Следует, однако, отметить, что эти терминологии не полностью эквивалентны и расположены в таком порядке, чтобы сравнение было провести легче. Традиционная терминология отталкивается от точек (моментов) во времени, тогда как терминология ДД использует временные отрезки.

8.1.1. Опорная фаза

1. **Касание пяткой:** относится к моменту, когда пятка выносимой вперед ноги касается опоры (рис. 8.6). ДД: начальный контакт относится к моменту, когда стопа выносимой вперед ноги касается опоры. При нормальной ходьбе точкой контакта является пятка. При нарушениях походки начальный контакт с опорой может производиться либо всей стопой, либо начинаться с пальцев ног.



Рис. 8.6. Касание пяткой: относится к моменту, когда пятка выносимой вперед ноги касается опоры. Касание правой пяткой на диаграмме представляет собой начало опорной фазы для правой ноги. Касание пяткой — синоним начального контакта

2. **Опора на всю стопу:** начинается сразу же после касания пятки; это точка, когда стопа полностью контактирует с опорой (рис. 8.7). ДД: нагрузочная реакция происходит немедленно после начального контакта и продолжается до отрыва контралатеральной ноги от опоры и конца двухопорной фазы.

3. **Середина опоры** — это точка, в которой вес тела находится точно над опорной ногой (рис. 8.8). ДД: середина опоры начинается, когда контралатеральная конечность отрывается от опоры и продолжается до положения, при котором тело приходит над опорной конечностью (рис. 8.9)*.

4. **Отрыв пятки** — это точка, в которой пятка эталонной конечности отрывается от опоры (рис. 8.10). ДД: граница опоры — это период от окончания середины опоры до точки непосредственно перед начальным контактом контралатеральной конечности или следующий за отрывом пятки эталонной конечности (рис. 8.11).

Рис. 8.7. Постановка на всю стопу происходит сразу после касания пяткой и определяется как точка, при которой стопа полностью находится на опоре. Период нагрузочной реакции (ДД) продолжается от начального контакта до отрыва противоположной ноги от опоры в конце двухопорного периода

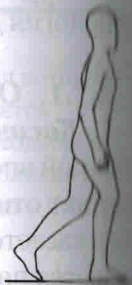


Рис. 8.8. Середина опоры — это точка, в которой вес тела проходит точно над опорной ногой. Пунктирной линией на диаграмме выделен момент середины опоры правой ноги. Середина опоры охватывает период от полной постановки стопы до начала отрыва пятки

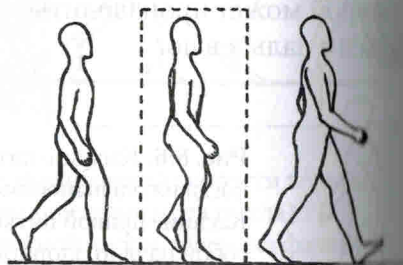


Рис. 8.9. Середина опоры (ДД) начинается, когда контралатеральная конечность отрывается от опоры и продолжает движение в позиции, в которой тело начинает двигаться вперед над опорной конечностью

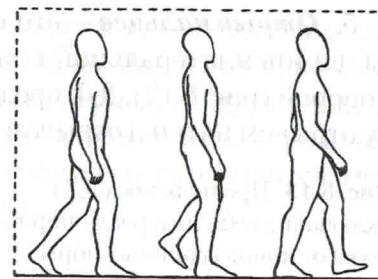


Рис. 8.10. Отрыв пятки — точка, в которой пятка эталонной ноги (на диаграмме — правой) отрывается от поверхности опоры

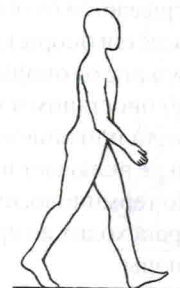


Рис. 8.11. Период границы опоры (ДД) включает в себя интервал опорной фазы от конца середины опоры (ДД) до момента, наступающего сразу после отрыва пятки эталонной конечности (на диаграмме — правой) от опоры. Соответственно, отрыв пятки падает в период границы опоры

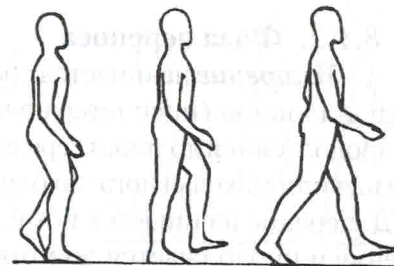
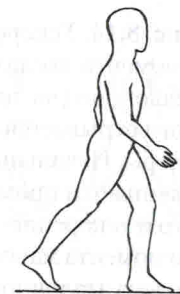


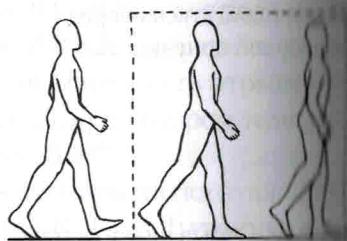
Рис. 8.12. Отрыв пальцев определяется как точка, которой только большой палец эталонной ноги (на диаграмме — правой) касается опоры. Период от отрыва пятки до отрыва пальцев часто называют периодом наклонения опорной фазы



* В отечественной литературе это обычно называют фазой полета. — Прим. авт.

5. **Отрыв пальцев** — это точка, в которой только большой палец ипсилатеральной конечности находится в контакте с опорой (рис. 8.12). ДД: предперенос обозначает период между отрывом пятки и отрывом пальцев (рис. 8.13).

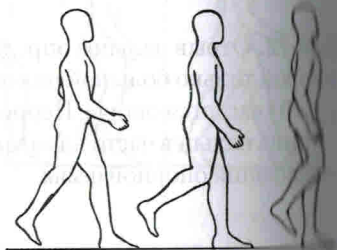
Рис. 8.13. Предперенос (ДД) включает в себя интервал опорной фазы от конца границы опоры (сразу после того, как правая пятка отрывается от опоры и левая пятка касается опоры) до момента отрыва пальцев от опоры. Предперенос не сопоставим в точности с отталкиванием, поскольку он не включает в себя отрыв пятки. По терминологии ДД отрыв пятки происходит во время границы опоры



8.1.2. Фаза переноса

1. **Ускорение** начинается сразу после того, как большой палец эталонной (ипсилатеральной) ноги отрывается от опоры и продолжается до точки середины переноса, в которой переносимая или маховая нога находится точно под телом (рис. 8.14). ДД: перенос начинается в той же точке, где начинается ускорение и продолжается до момента максимального сгибания в колене эталонной (ипсилатеральной) конечности.

Рис. 8.14. Ускорение начинается с момента, когда большой палец эталонной (на диаграмме — правой) ноги отрывается от поверхности опоры. Начальный перенос (ДД) начинается примерно в той же точке, что и ускорение, и продолжается до момента максимального сгибания колена эталонной ноги



2. **Середина** переноса происходит, когда ипсилатеральная конечность проходит непосредственно под телом (рис. 8.15). ДД: середина переноса охватывает период, следующий непосредственно за максимальным сгибанием колена, и продолжается до тех пор, пока большая берцовая кость находится в вертикальном положении (рис. 8.16).

Рис. 8.15. Середина переноса наблюдается, когда эталонная конечность проходит непосредственно под телом. На диаграмме правая нога только что прошла под туловищем. Период середины переноса считается от конца ускорения до начала замедления



Рис. 8.16. Середина переноса (ДД) — это период от максимального сгибания колена до момента, когда большая берцовая кость занимает вертикальное положение

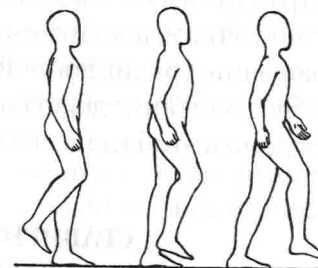
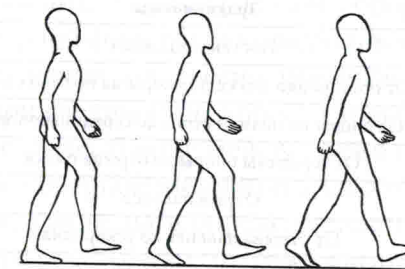


Рис. 8.17. Замедление — это момент, когда колено выпрямляется при подготовке к постановке пятки. Конечная фаза переноса (ДД) включает в себя период, когда большая берцовая кость идет в вертикального положения в точке полного разгибания колена перед начальным контактом



Глава 20

ЭЛЕМЕНТЫ СТРОЕНИЯ МЫШЦ

В скелетной мускулатуре есть два вида материалов: мышечная (сократительная) и соединительная (не обладающая сократительными свойствами) ткани. Свойства этих тканей и способы их взаимосвязей придают мышцам их уникальные характеристики. Основными свойствами мышечной ткани являются сократимость и возбудимость. **Сократимость** характеризует способность мышцы к развитию напряжения. **Возбудимость** — это способность мышцы реагировать на химические, электрические и механические стимулы. Кроме того, мышечная ткань, как и любая другая живая ткань, при пассивной нагрузке демонстрирует вязкоупругие свойства.

20.1. Состав мышечного волокна

Скелетная мышца состоит из многих тысяч мышечных волокон. В состав изолированной мышцы входит множество пучков, групп мышечных волокон, окруженных соединительной тканью (рис. 20.1, *a*). Организация, количество, размер и тип этих волокон может в различных мышцах варьировать, но при этом каждое волокно является отдельной мышечной клеткой, окруженной клеточной мембраной, называемой **сарколеммой** (рис. 20.1, *b*). Как и остальные клетки тела, мышечное волокно состоит из цитоплазмы, которая в мышце называется **саркоплазма**. В саркоплазме находятся структуры, называемые миофибриллами (рис. 20.1, *c*), являющиеся сократительными структурами мышечного волокна и не относящиеся к миофибриллам структуры: рибосомы, гликоген и митохондрии, необходимые для клеточного метаболизма.

Миофибрилла состоит из толстых и тонких нитей, называемых миофиламентами (рис. 20.1, *d*). Тонкие миофиламенты состоят из белка актина, толстые — из белка миозина. Взаимодей-

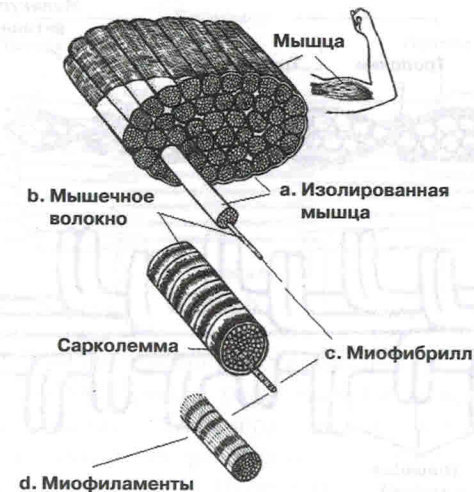


Рис. 20.1. Состав мышечного волокна:

- а — группы мышечных волокон образуют связки (пучки);
- б — мышечное волокно обернуто в клеточную мембрану (сарколемму);
- в — мышечное волокно содержит структуры (миофибриллы);
- д — миофибрилла состоит из толстых миозиновых и тонких актиновых миофиламентов

ствие этих двух миофиламентов необходимо для сокращения мышцы. Тонкие миофиламенты образованы двумя напоминающими цепочки перевитыми нитями молекул актина. В выемках между двумя актиновыми нитями находятся компактные молекулы белка тропонина, и к каждой молекуле тропонина прикреплен белок тропомиозин (рис. 20.2, *a*). Молекулы тропонина и тропомиозина контролируют связь миофиламентов актина и миозина.

Толстые миофиламенты состоят из крупных молекул миозина, которые организованы так, что образуют длинные молекулярные нити (рис. 20.2, *b*). Диаметр миофиламентов, образованных молекулами миозина, не одинаков по всей их длине, в средней части они шире. Каждая молекула миозина имеет сферические утолщения, называемые головными группами.

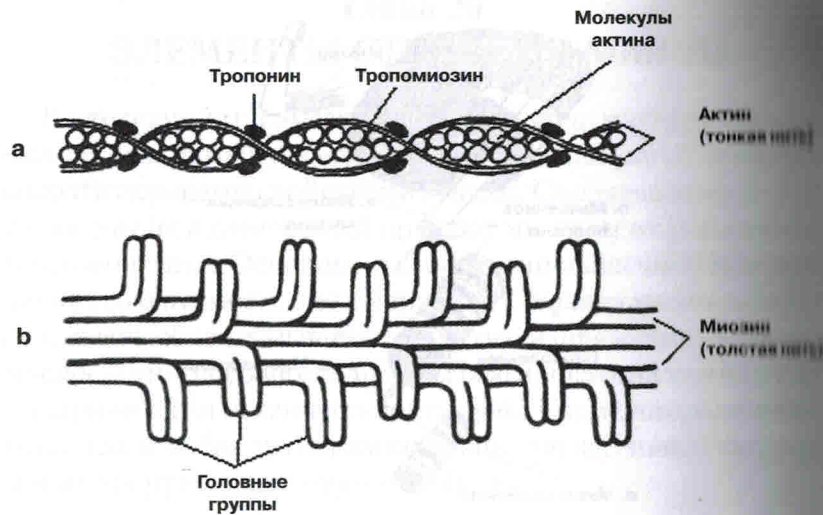


Рис. 20.2. Миофиламенты:

a — молекулы актина показаны на рисунке кружочками. Молекулы тропонина имеют сферическую форму; показано их расположение в выемках между двумя нитями молекул актина. Молекулы тропомиозина тонкие и лежат вдоль бороздок в актиновых нитях; **b** — миофиламент миозина с головными группами или шаровидными утолщениями

Головные группы, которые могут поворачиваться, как шарниры, и являются местами связи для прикрепления актина, играют важнейшую роль в сокращении и расслаблении мышцы. Если рассматривать под микроскопом миофибриллу целиком, то заметно, что чередование толстых (миозиновых) и тонких (актиновых) миофиламентов, образует отчетливый полосатый паттерн, что хорошо видно на (рис. 20.1, *d*). Поэтому скелетные мышцы часто называют поперечнополосатыми. Схематическое представление порядка чередования миофиламентов в миофибрилле показано на (рис. 20.3).

Мышечное волокно состоит также из нескольких структурных белков. Некоторые из этих белков (промежуточные нити) создают как бы структурный каркас для мышечного волокна

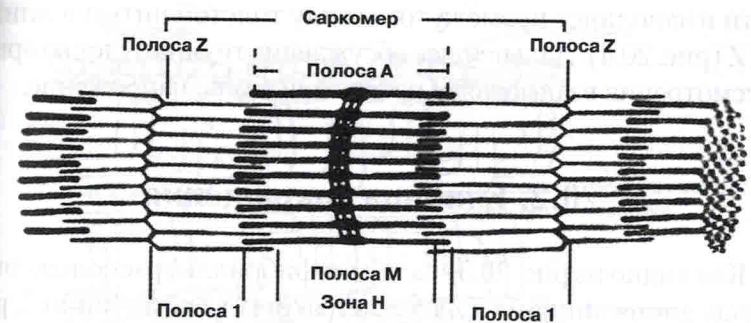


Рис. 20.3. Расположение миофибрилл в мышце в состоянии покоя. Саркомер — часть миофибриллы, расположенная между полосами (или линиями) Z. Полоса A саркомера — наложение нитей миозина и актина. Часть полосы A, содержащая только нити миозина, без наложения, называется зоной H. Полоса M, расположенная в центральной части зоны H, содержит поперечно ориентированные нити миозина, соединяющие одну нить миозина с другой. Полоса I представлена только волокнами актина

и другие (например, десмин) могут участвовать в передаче силы по волокну и к соседним волокнам. Один из белков, титин, играет особо важную роль, сохраняя положение толстой нити при мышечном сокращении и при развитии пассивного напряжения. Титин — это крупный белок, который крепится вдоль толстой

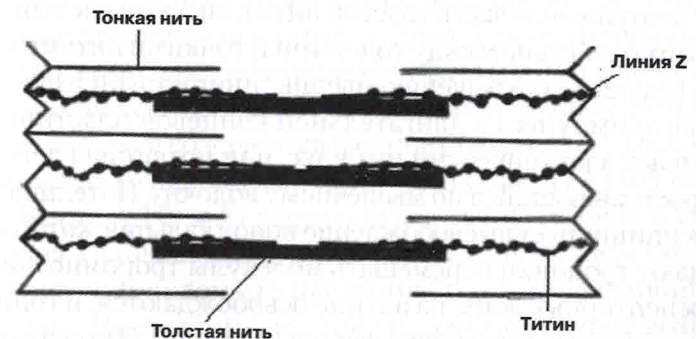


Рис. 20.4. Саркомер. Взаимосвязь между титином, толстыми и тонкими нитями

нити и заполняет промежуток между толстой нитью и линиями Z (рис. 20.4). Дальнейшее обсуждение титина будет во время рассмотрения взаимосвязи пассивная длина/напряжение.

20.2. Единица сокращения

Как видно из рис. 20.3, часть миофибриллы, расположенной между двумя линиями Z, называется саркомером. Линии Z, расположенные по всей миофибрилле с равными интервалами, не только служат границами саркомера, но также связывают нити. Области саркомера, называемые полосами или зонами, помогают идентифицировать расположение толстых и тонких нитей. Часть саркомера, которая захватывает как толстые нити, так и часть тонких нитей, называется анизотропной полосой, или полосой А. Области, в которые входят только тонкие нити, называются изотропными, или полосами I. Термины «анизотропный» и «изотропный» относятся к поведению этих частей волокон при освещении. Центральная часть толстой нити (область полосы А), в которой нет наложения толстых и тонких нитей, называется зоной H. Центральная часть зоны H, состоящая из широких средних отделов толстых нитей, называется полосой M. В полосе M небольшие молекулы структурного белка соединяют центральную часть толстой нити с нитью выше или ниже.

Взаимодействие между толстыми и тонкими нитями саркомера, ведущее к сокращению мышцы, инициируется приходом нервного импульса к двигательной концевой пластинке, где возникает электрический импульс, или потенциал действия, распространяющийся по мышечному волокну. Потенциал действия инициирует высвобождение ионов кальция, которые нуждаются тропонин перемещать молекулы тропомиозина так, что рецепторные зоны на актине освобождаются, и головные группы миозина могут связываться с актином. Эта связь нитей называется поперечным мостиком и рассматривается как основная единица активного мышечного напряжения (рис. 20.5).

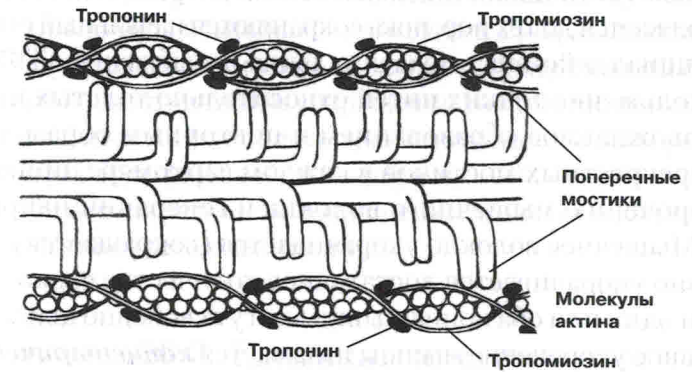


Рис. 20.5. Образование поперечного мостика. Головные группы миозина прикрепляются к зонам связи на актине, которые открываются во время сдвига тропомиозина. Тонкие актиновые нити протягиваются вдоль нитей миозина за счет движения головных групп. Хотя на рисунке показаны только два поперечных мостика, во время мышечного сокращения они образуются во многих зонах

Механизм, при помощи которого создается активное напряжение мышцы, назван циклом поперечного мостика. В состоянии покоя поперечные мостики не прикрепляются к тонким нитям. В ответ на поток ионов кальция, вызывающий сдвиги тропомиозина, головная группа миозина прикрепляется к открытой зоне связи на тонкой нити. Миозин обладает высокой степенью притяжения к актину в тонкой нити. Причиной этого является комплекс аденозиндифосфата (АДФ) и неорганического фосфата (Pi), связанный с головной группой. В головной группе миозина содержится фермент (миозин АТФаза), катализирующий гидролиз аденозинтрифосфата (АТФ) на АДФ и Pi. Когда АДФ и Pi высвобождаются из головной группы миозина, головная группа заставляет тонкую нить скользить по толстой. В целом это напоминает действие шарнира или вертлюга. После этого действия в головной группе возникает сильное притяжение к АТФ, и последующее соединение АТФ с головной группой опять вызывает выпуск поперечного

мостика. Такой цикл возникновения перекрестных мостиков продолжается до тех пор, пока сохраняются начальный стимул (потенциал действия), подача кальция и снабжение АТФ.

Скольжение тонких нитей относительно толстых нитей, сопровождаемое образованием и повторным образованием перекрестных мостиков в каждом саркомере, приводит к укорочению мышечного волокна и генерации напряжения. Мышечное волокно укорачивается (сокращается), если активно укорачивается достаточное количество саркомеров и если один или оба конца мышцы могут свободно двигаться. Активное укорочение мышцы называется **концентрическим сокращением**, или сокращением укорочения. По контрасту с сокращением укорочения, при котором тонкие нити тянутся в направлении толстых, мышца может производить **эксцентрическое сокращение**, или сокращение удлинения. При сокращении удлинения тонкие нити оттягиваются от толстых, перекрестные мостики рвутся и образуются снова, по мере удлинения мышцы. Напряжение в мышце создается, когда происходит повторное образование перекрестных мостиков. Эксцентрические сокращения наблюдаются, когда мышца активно сопротивляется движению, создаваемому внешней силой (такой, как сила тяжести или, что бывает реже, сила, создаваемая другой мышцей). Если сила, развиваемая в цикле перекрестных мостиков, равна внешней силе, изменения длины мышечного волокна не происходит. Сокращение мышечного волокна без изменения длины называется **изометрическим сокращением**.

Кратко суммируем важные факты, касающиеся мышечного сокращения на уровне саркомера:

- напряжение создается при образовании перекрестных мостиков;
- инициатором мышечного сокращения является поток ионов кальция;
- топливом для цикла поперечных мостиков является гидролиз АТФ;

- при концентрическом сокращении тонкие миофиламенты втягиваются в направлении толстых миофиламентов, образуются, рвутся и вновь образуются поперечные мостики;
- при эксцентрическом сокращении тонкие миофиламенты оттягиваются от толстых, поперечные мостики рвутся, вновь образуются и опять рвутся;
- при изометрическом сокращении длина мышечного волокна является постоянной.

20.3. Единица движения

Хотя саркомер является основной единицей напряжения мышцы, он на самом деле только часть большого комплекса, называемого **двигательной единицей**. Стимул, который получает мышца и который запускает сократительный процесс, передается по нерву, называемому моторным альфа-нейроном (рис. 20.6). Тело нейрона находится в переднем роге серого вещества спинного мозга. Аксон идет от тела нейрона к мышце,

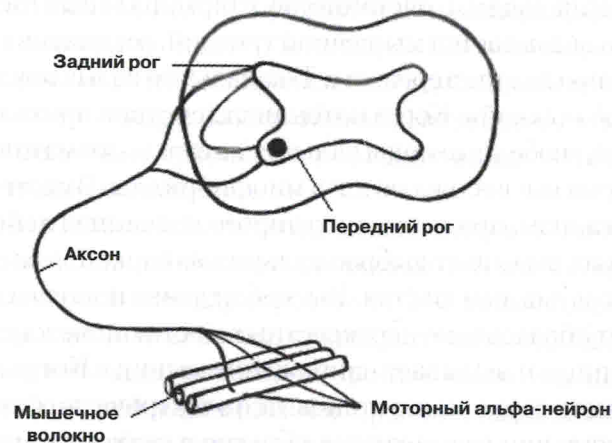


Рис. 20.6. Моторный альфа-нейрон. Тело нейрона показано черной точкой в переднем роге