

Министерство образования и науки РФ
ГОУ ВПО «Ярославский государственный педагогический университет
имени К.Д. Ушинского»

А.В. Муравьев, А.А. Муравьев, Е.Н. Квасовец

БИОМЕХАНИКА

ФИЗИЧЕСКИХ УПРАЖНЕНИЙ

учебное пособие

Ярославль
2007

УДК 796.612

ББК
28.984я73
М 91

Печатается по решению редакционно-издательского совета ЯГПУ имени К.Д. Ушинского

Допущено Министерством образования и науки РФ в качестве учебного пособия для студентов факультетов физической культуры педагогических университетов по специальности №2114 **ФИЗИЧЕСКАЯ КУЛЬТУРА»**

Муравьев, А.В., Муравьев, А.А., Квасовец, Е.Н. Биомеханика физических упражнений [Текст] : учебное пособие. – 2-е издание дополненное и переработанное. – Ярославль: изд-во ЯГПУ, 2007. – 92 с. : с ил. 60.

В учебном пособии по биомеханике физических упражнений рассматриваются вопросы общей и частной биомеханики, в том числе ее предмет, задачи, связи с другими науками, а также возрастные особенности механики движений, пути использования знаний предмета в физическом воспитании и спортивной тренировке. Содержание учебного пособия соответствует требованиям государственного образовательного стандарта по предмету «биомеханика».

Пособие предназначено студентам факультетов физической культуры педагогических университетов по специальности 2114 – «Физическая культура».

Рецензенты: доктор мед. наук, профессор А.Г.Гущин
доктор мед. наук В.С.Шинкаренко

ISBN 978-5-87555-383-X

- © ГОУ ВПО «Ярославский государственный педагогический университет имени К.Д. Ушинского», 2007
- © Муравьев А.В., Муравьев А.А., Квасовец Е.Н., 2007

ОБОЗНАЧЕНИЯ

A	– площадь; работа силы
F	– сила; функция
G	– сила тяжести
g	– ускорение свободного падения (9,8 м·с ⁻²)
L	– длина
M	– масса тела
J	– момент инерции
M	– момент силы; крутящий момент
N	– мощность
P	– давление
Q	– кинетический момент; объемный расход жидкости
R	– радиус; сопротивление
S	– путь тела или точки; длина траектории
Si	– импульс силы
T	– темп движения
Dt (dt)	– промежуток времени или длительность движения
V	– скорость линейная
w	– скорость угловая
a	– ускорение (линейное)
e	– угловое ускорение
ОЦТ	– общий центр тяжести

ПРЕДИСЛОВИЕ

В процессе жизнедеятельности человек непрерывно взаимодействует с окружающей средой. Наиболее активная роль в этом процессе принадлежит его двигательной деятельности, включающей как ориентировку в пространстве и во времени, так и непосредственно само движение. Сведения о природе и закономерностях движений постоянно расширяются. Этому во многом способствуют экспериментальные наблюдения и измерения, на основе которых разрабатываются теоретические положения, углубляющие наши знания. Реальный прогресс технической подготовки спортсменов, применение новых способов выполнения упражнений во многом обусловлен практикой. Анализ ее достижений, обоснование технического совершенства на точном языке науки для широкого использования в спортивной педагогике является актуальной задачей биомеханики. Поэтому в пособии по биомеханике основное место отведено способам анализа, обеспечивающим количественную оценку поз, положений тела и движений человека в пространстве и во времени, а также оценку обуславливающих их причин – действующих сил.

В системе дисциплин, преподаваемых на факультетах физической культуры, биомеханика решает задачу формирования знаний у студентов на материалистической основе, используя для раскрытия закономерностей движений человека, точный математический аппарат.

Биомеханический анализ физических упражнений представляет собой не только конкретный метод изучения движений. Это и особый способ мышления, поскольку необходимо понимать всю сложность процессов механического движения человека, их совершенства, которое выработано в процессе эволюции; это способ раскрытия целесообразности в физике живого.

В качестве теоретической основы курса приняты основные положения отечественной школы биомеханики, созданной трудами Н.А. Бернштейна и его последователей. Эти положения развиты в дальнейшем работами Д.Д. Донского, В.М. Зациорского, И.М. Козлова, В.М. Дьячкова, В.Б. Коренберга, И.П. Ратова, В.Л. Уткина и др., где основу составляет теория структурности движений и системно-структурный подход к их изучению.

В содержании курса используются понятия и закономерности ряда смежных физико-математических, технических, биологических и педагогических наук.

Глава 1. Предмет, задачи и методы биомеханики

1.1. Предмет биомеханики физических упражнений

Биомеханику можно определить как науку о законах механического движения живых организмов. В каждой научной дисциплине необходимо выделить ее предмет познания и метод, как путь научного исследования, способ получения новых знаний. Предмет научной дисциплины определяет, что и с какой целью изучается в ее рамках. Биомеханику определяют как науку, изучающую механическое движение живых существ, как часть биофизики.

Всякое изменение материи называется движением. Одним из простейших является механическое движение – перемещение материальных объектов в пространстве и с течением времени, без рассмотрения физических свойств движущихся материальных объектов и их изменения в процессе движения. Тело человека принадлежит к материальным телам. Материальные тела различны, но движение их обладает многими общими свойствами, в том числе и не зависящими от физических свойств самих тел.

Движение живых существ представляет собой сложное явление. Здесь мы встречаем сочетание самого простого – механического движения, которое изучает механика, с более высокими формами, которые изучаются химией, биологией, психологией и другими науками. Следовательно, можно полагать, что биомеханика, разрабатывая собственные пути изучения механического движения живых существ, опирается, при этом, на целый ряд смежных дисциплин (рис. 1).



Рис. 1. Пример связи биомеханики с другими научными дисциплинами

Прежде всего, это анатомия. Для изучения движений человека необходимо хорошо знать, как устроен его опорно-двигательный аппарат с точки зрения биомеханики. При этом надо опираться на сведения, полученные в курсе анатомии. Это означает, что следует ясно представлять принципы строения пассивной части двигательного аппарата (кости и их соединения) и его активной части (мышечная система).

Биомеханика как одна из биологических наук нового типа сближается по методам исследования с точными науками. Она развивается как раздел биофизики, возникшей на стыке биологических и физических областей знаний. Следовательно, для изучения движений в спорте необходимо раскрытие их механической и биологической природы. Поэтому такие биологические дисциплины, как спортивная морфология, физиология физических упражнений, могут содействовать пониманию конкретных специфических особенностей формы, строения, функций и движения тела человека. В этом смысле вполне справедливо рассматривать биомеханику как современную область биологического знания с педагогической направленностью [Д.Д. Донской, 1975].

Обобщая все сказанное можно заключить, что предметом биомеханики является изучение закономерностей механического движения живых систем. При этом любая из рассматриваемых систем представляет собой комплекс взаимодействующих элементов. Состав системы определяется входящими в нее элементами, а способ взаимодействия указывает на структуру системы. Примером этому может служить гимнастическая комбинация, состоящая из отдельных элементов, которые определяют ее состав, способ их объединения в целое – указывает на тип структуры.

Если для анализа взяты механические движения человека при выполнении физического упражнения, то объектом познания будут двигательные действия как системы взаимно связанных активных движений. В этом случае изучение механических и биологических причин движения составляет область изучения биомеханики физических упражнений.

У человека особенностями движения является их осознанная, целенаправленная природа. То есть, при выполнении упражнений происходит понимание их смысла, имеется возможность их контролировать и планомерно совершенствовать. До выполнения двигательного действия создается его «замысел» и формируется его «мозговая модель», как задание на предстоящее будущее, по Н.А. Бернштейну.

При помощи двигательной деятельности человек в процессе занятий физической культурой и спортом преобразует свою природу, физически совершенствуется. Двигательная деятельность человека складывается из его действий, то есть таких движений, которые имеют цель и определенный смысл. Следовательно, теория целенаправленных движений человека включает изучение цели и программы ее достижения.

1.2. Задачи биомеханики физических упражнений

Постановка задач в изучении научной дисциплины дает возможность определить не только ее содержание, но метод исследования. Последний как раз и разрабатывается для решения задач данной научной дисциплины. Выделяют общую задачу, которая охватывает всю область научной дисциплины в целом, а также большой комплекс частных задач, которые направлены на решение конкретных вопросов изучаемых явлений.

Общей задачей биомеханики является оценка эффективности приложения сил для достижения поставленной цели (рис. 2).

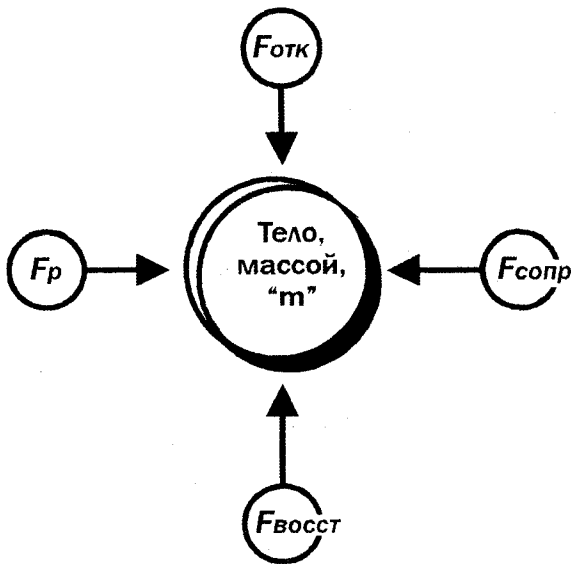


Рис. 2. Картина, действующих на тело сил
Обозначения: F_p – сила рабочая, $F_{отк}$ – отклоняющая сила (создающая моменты), $F_{восст}$ – сила восстанавливающая (создающая моменты восстановления), $F_{сопр}$ – сила сопротивления

При решении этой ведущей задачи происходит поиск наиболее совершенных способов выполнения двигательных действий и определение наиболее рациональных путей обучения этим движениям. Следовательно, можно говорить о педагогической направленности биомеханики физических упражнений уже при решении ведущей задачи биомеханики.

Некоторыми частными задачам биомеханики являются:

1. анализ двигательных характеристик при изучении движений;
2. изучение строения и свойств двигательного аппарата человека;
3. изучение двигательных структур и управления движениями;
4. анализ общих основ техники отдельных

видов двигательной деятельности (видов спорта);

5. оценка рациональности и эффективности спортивной техники.

1.3. Содержание биомеханики

Основу любой научной дисциплины составляет ее теория. В содержание биомеханики также входят ее теории, которые представляют собой совокупность накопленных знаний. При этом они формируют определенную систему. В своей основе теория данного предмета имеет системно-структурную организацию. Ее сущность состоит в том, что сложные объекты рассматриваются как целостные системы, организованные по определенной схеме (структуре), при одновременном рассмотрении взаимодействия элементов из которых состоит система. Биомеханика физических упражнений рассматривает несколько теорий, однако ведущей принято считать теорию структурности движений. В ней заложены следующие основные принципы (Д.Д. Донской, В.М. Зацюрский):

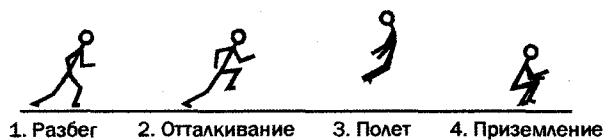
- принцип структурности построения систем движений – все движения в системе взаимосвязаны; именно эти структурные связи определяют целостность и совершенство действия;
- принцип целостности действия – все движения в двигательном акте образуют единое целое, единую систему движений, направленную на достижение цели (целенаправленные действия). Изменение каждого движения так или иначе влияет на всю систему;
- принцип сознательной целенаправленности системы движений – человек сознательно ставит цель, использует необходимые движения и управляет ими для достижения этой цели.

В биомеханике для изучения двигательных действий опорно-двигательный аппарат рассматривают как биомеханическую систему. Закономерности движений во многом зависят от особенностей строения и функций тела человека. Двигательный аппарат человека является в этом случае своего рода упрощенной копией, моделью, в которой учтены только наиболее существенные особенности движений (данный раздел теории биомеханики в настоящее время интенсивно развивается).

Двигательные действия человека в теории биомеханики рассматриваются как системы движений. В науке имеется много определений системы. Достаточно просто и в то же время полно

систему можно определить так, как предлагалось выше; то есть как упорядоченное множество взаимодействующих элементов. Для оценки эффективности работы системы важно выявить роль каждого элемента (системный анализ) в этом комплексе и оценить их взаимодействие. В последнем случае изучают эффект взаимодействия (объединения) элементов, то есть проводят системный синтез.

В процессе совершенствования движений происходит изменение характера двигательных действий, перестройка всей системы, появляются новые системные свойства, такие, которых не было у отдельно взятых элементов. Обычно объединение элементов движений в систему (сборка системы) способствует появлению новых системных свойств. Так, например, система двигательных действий – «прыжок в длину с разбега» состоит из следующих элементов:



В этой системе каждый элемент решает свою задачу, а их объединение способствует появлению новых свойств, что проявляется в достижении более высокого конечного результата (прыжка на большое расстояние) чем, например, при выполнении прыжка с места.

Таким образом, формирование и совершенствование системы движений составляет содержание следующего, третьего раздела теории биомеханики.

В содержание биомеханики входит изучение опорно-двигательного аппарата, оценка двигательных характеристик двигательных действий (кинематические и динамические характеристики), и особую часть составляет управление движениями человека. Человек может взаимодействовать с окружающей средой и влиять на нее только при помощи своих скелетных мышц. Они позволяют нам осуществить самые разнообразные движения – от ходьбы и бега до таких тончайших двигательных актов, как письмо, мимика, жесты, при помощи которых мы можем передавать оттенки настроения, мыслей и эмоций.

Закономерности управления движениями накладывают особый отпечаток на сами движения. Хорошо известно, что только человек, в отличие от других существ, может активно познавать законы природы и правильно их применять. Это хорошо проявляется на примере управления двигательными действиями, которые имеют целенаправленный характер.

Обучение движениям и техническая подготовка в спорте в своей основе имеют анализ выполнения упражнений, как управляемых действий. Теория биомеханики дает обоснование методу системного анализа, проводимого на основе количественных, двигательных характеристик. Метод науки – это основной способ исследования, путь получения знаний о предмете или явлении. Метод дает возможность получить новые данные и выявить новые закономерности.

Важный и принципиальный путь познания в биомеханике – это соединение анализа и синтеза, то есть расчленение системы (упражнения) на отдельные части, их изучение, затем объединение, суммирование этих частей в целое (рис. 3).



Рис. 3. Пример, иллюстрирующий взаимодействие двух методов исследования в биомеханике: (1) анализ расчленения системы на отдельные элементы с возможностью их отдельного совершенствования, (2) объединение в целостную систему (например, гимнастическая комбинация)

Ведущим разделом работы по технической подготовке в спортивной тренировке у спортивного педагога является системный анализ выполнения движений спортсменом. В первую очередь, это количественный биомеханический анализ движения. В его основе лежит использование точных двигательных характеристик, полученных при помощи приборных измерений (например, регистрация траектории и пути движения тела, скорости и темпа движений, ускорения тела и его частей). Получение двигательных характеристик облегчается при использовании цифровой фото- и видеотехники с последующей компьютерной обработкой и анализом полученных материалов.

Двигательное действие как система не является простой суммой составляющих ее частей. Это не простые аддитивные системы. Здесь части системы объединены многочисленными взаимосвязями, придающими ей новые, не свойственные отдельным элементам качества (системные свойства). Способ взаимосвязи частей в системе, закономерности их взаимодействия представляют ее структуру. При изучении количественных двигательных характеристик, определяют, как элементы влияют друг на друга, выявляют причины, обеспечивающие целостность системы. В этом и заключается системный синтез двигательного действия.

Наиболее часто в практике физического воспитания возникает необходимость в проведении

биомеханического анализа. Его выполнение включает следующие этапы:

- Изучение внешней картины двигательной деятельности. При этом используют регистрацию кинематических (пространственно-временных) характеристик.
- Выявление причин, вызывающих и изменяющих движение. Как правило, механизм и причины возникновения движения тела или его частей не доступны визуальному контролю и для проведения количественного анализа требуется регистрация динамических характеристик. При этом необходимо всегда помнить, что в основе возникновения движений тел лежит действие сил или их моментов (момент силы это произведение ее модуля на плечо ее действия во вращательном движении).
- Определение топографии работающих мышц. При проведении этой части комплексного анализа выявляют, какие мышцы и какие их моменты тяги участвуют в выполнении данного движения. Знание топографии работающих мышц позволяет отобрать те движения, которые в большей степени способствуют развитию данной группы (групп) мышц.

В зависимости от того, какая часть всей мышечной массы тела включается в работу, различают:

- глобальную мышечную работу (вовлечено более 2/3 всех мышц тела, например, спринтерский бег, интенсивное плавание);
- регионарную (от 1/3 до 2/3 – ряд общеразвивающих упражнений);
- локальную (менее 1/3 всей мышечной массы, например, движение одной рукой).

Для адекватной оценки функциональной топографии мышц в каждом конкретном двигательном акте необходимо регистрировать их электрическую активность. Последняя пропорциональна степени интенсивности мышечного напряжения. Метод регистрации электрической активности мышц называется электромиографией.

Определение энергетических затрат

Для этого необходимо регистрировать энергетические характеристики движения. Наряду с оценкой величины энерготрат важно определить экономичность двигательных действий, то есть выявить коэффициент полезного действия мышечной системы при той или иной ее форме ак-

тивности. Например, известно, что у стайеров высокой квалификации прирост экономичности бега на 20% дает возможность переместиться в списке лучших с 10-го на 1-е место.

1.4. Организация биомеханического исследования

Для изучения двигательной деятельности человека применяются специфические биомеханические методы (приемы) исследования. В том случае, когда это необходимо, используют методы смежных наук: биологических, психологических, педагогических, математических и др. Методы биомеханического исследования позволяют получить количественные характеристики движений и выявить их взаимозависимость.

Характер биомеханического исследования определяется задачами, а выбор конкретных методик зависит от конечной цели биомеханического анализа.

Задачи биомеханического исследования весьма многообразны. От их постановки зависит не только выбор методик и организация исследования, но и пути обработки полученных данных, направление анализа.

Постановка задачи исследования в значительной мере определяет:

- что изучать (какие биомеханические зависимости и закономерности);
- на каком материале (объекте) предстоит исследовать ту или иную проблему биомеханики;
- в каких условиях собирать данные; каким способом получать и обрабатывать их.

Исходя из задач исследования, выбирают комплексы частных методик. Чтобы поставить конкретную задачу, нужно знать существующие методики, позволяющие ее решить, или возможность их создания. На основе поставленной задачи определяют, какие характеристики необходимо исследовать.

Одни из них можно получить только расчетным способом, как производные от регистрируемых показателей движения (например, темп движения, как частное от количества двигательных действий и длительности времени их выполнения, также момент инерции, скорости и ускорения тел) другие (чаще пространственные, временные и силовые характеристики) – путем непосредственной регистрации.

После установления того, какие характеристики надо регистрировать, определяют условия сбора данных (естественные, специально созданные для эксперимента и др.).

Наблюдения в естественных условиях тренировки и соревнований проводят так, чтобы они не служили помехой движениям человека. На-

блюдатель может пользоваться измерительными приборами (рулетка, секундомер, оптические системы наблюдения) и фото- и видеоаппаратурой. Основное условие зрительного или инструментального наблюдения – получение объективных данных, при этом требуется обеспечить невмешательство в естественный ход движения.

При проведении эксперимента (научного опыта) создаются специальные условия, в которых решаются поставленные в исследовании задачи. Может быть организован естественный эксперимент, в этом случае испытуемые будут находиться в строго определенных условиях и при этом будет обеспечено наименьшее вмешательство в их двигательные действия.

На современном уровне развития биомеханики широко применяется лабораторный эксперимент. Он начинается с изучения закономерностей в измененных и только в чем-то сходных движениях и кончается построением математической модели движения с анализом ее особенностей. Математическое моделирование при этом становится самостоятельным методом исследования. Особенно в том случае, когда требуется выявить сложные закономерности организации системы движений.

Современные комплексные методики включают ряд приемов регистрации и обработки данных, взаимно дополняющих, а иногда и дублирующих (для проверки) друг друга.

Тот или иной метод исследования выбирают исходя из того, насколько он обеспечивает получение достоверных и доступных данных.

Важно, чтобы такой метод:

- обеспечивал достаточную точность измерений;
- не искажал движений (не обременял бы испытуемого);
- был надежным и удобным для применения;
- мог применяться в условиях проведения наблюдений и эксперимента;
- давал материал, удобный для последующей обработки, в том числе и компьютерной;
- был совместим с другими необходимыми методами.

В биомеханическом исследовании в основном выделяют три этапа:

1. регистрация характеристик;
2. математическая и статистическая обработка данных регистрации;
3. биомеханический анализ.

Для оценки эффективности движений устанавливаются, насколько успешно решена двигательная задача и какова «энергетическая стоимость» ее решения, насколько рационально (с учетом закономерности биомеханики) достигнута цель. Для этого изучается результат движения, условия его выполнения и соответствие движений задаче достижения цели и конкретным возможностям. На этом этапе исследования необходимо широкое сопоставление возможностей человека с их реализацией.

Резюме

Биомеханику определяют как науку, изучающую законы механического движения человека и других живых систем в зависимости от действующих сил. На основе этих законов устанавливаются принципы взаимодействия человека, его двигательного аппарата с окружающей средой. В этой связи биомеханику рассматривают как часть биофизики. Она имеет дело как с физическими, так и с биологическими явлениями. Биомеханика решает многочисленные теоретические и практические задачи при изучении двигательной деятельности человека. При решении этих задач биомеханика использует данные других наук. И, в первую очередь, теоретической механики, анатомии, физиологии, кибернетики и математических наук.

Биомеханика изучает двигательные действия как системы, то есть комплексы взаимодействующих элементов. У человека особенностями движения является их осознанная, целенаправленная природа. При помощи двигательной деятельности человек в процессе физического воспитания активно преобразует свою природу, физически совершенствуется.

Исходя из задач каждой области знаний, определяется ее содержание – теория и метод. Теория и метод биомеханики разрабатываются для решения задач данной научной дисциплины. Общая задача охватывает всю область учения в целом, а также комплекс частных задач, которые направлены на решение конкретных вопросов изучаемых явлений.

При решении ведущей задачи происходит поиск наиболее совершенных способов выполнения двигательных действий и определение наиболее рациональных пу-

тей обучения этим движениям. Частные задачи биомеханики включают: анализ двигательных характеристик при изучении движений; изучение строения и свойств двигательного аппарата человека; изучение двигательных структур и управления движениями; анализ техники отдельных видов спортивных и рабочих движений.

В содержание биомеханики входит ее теория, которая представляет собой совокупность накопленных знаний. Теория данного предмета имеет системно-структурную основу. В теории структурности движений заложены следующие основные принципы:

- структурность построения систем движений – все движения в системе взаимосвязаны, именно эти структурные связи определяют целостность и совершенство действия;
- принцип целостности действия – все движения в двигательном акте образуют единое целое, единую систему движений, направленную на достижение цели (целенаправленные действия). Изменение каждого движения, так или иначе, влияет на всю систему;

- принцип сознательной целенаправленности системы движений – человек сознательно ставит цель, использует необходимые движения и управляет ими для достижения этой цели.

Биомеханика как наука имеет свой метод исследования. Это системный анализ – расчленение системы на отдельные элементы и изучение их по отдельности, а также системный синтез – изучение способов объединения элементов в систему. Для регистрации двигательных характеристик используют конкретные методики исследования.

Вопросы для повторения и закрепления материала главы

1. Что является предметом биомеханики двигательной деятельности человека?
2. Какие связи определяют место биомеханики в системе естественных наук?
3. Какие главные задачи можно выделить в биомеханике физических упражнений и пути их решения?
4. Что входит в понятие «содержание биомеханики»?
5. Что такое системно-структурный метод исследования в биомеханике?
6. Чем обусловлен основной метод познания биомеханических закономерностей движения?
7. Что включает в себя программа исследования биомеханических закономерностей двигательных действий?
8. Чем определяется комплексность биомеханического исследования?
9. Какие этапы включает биомеханическое исследование?

Глава 2. История развития биомеханики

Биомеханика – одна из самых старых ветвей биологии. К ее истокам относятся работы Аристотеля и Галена, посвященные анализу движений животных и человека. Поскольку современная биомеханика человека рассматривает его тело как систему рычагов, нельзя не упомянуть имя Архимеда (384–322 гг. до нашей эры). Кроме широкого применения рычагов в военном деле и анализа движения этого механизма, им заложены основы наших знаний о статическом плавании и о движении тел в воде.

Однако, только благодаря работам одного из самых блистательных людей эпохи Возрождения – Леонардо да Винчи – биомеханика сделала свой следующий шаг. Леонардо изобрел все, что можно было придумать без применения пара и электричества. Художник, инженер и ученый он особенно интересовался строением человеческого тела в связи с движением. Леонардо описал механику тела при переходе от сидения к стоянию, при ходьбе вверх и вниз, при прыжках и, по-видимому, впервые дал описание походок.

Необходимо отметить, что многие ученые, стоявшие у истоков биомеханики, – Галилей, Декарт, Ньютон, Бойль, Гук, Эйлер, Гельмгольц, Ван-дер-Поль и др. – внесли решающий вклад в развитие классической механики. Это еще раз подчеркивает связь с механикой и происхождение биомеханики.

Большое влияние на развитие биомеханики оказал итальянский натуралист, ученик Галилея Джованни Борелли. Он рассматривал организм как машину и стремился объяснить дыхание, движение крови, работу мышц с позиций механики. Борелли – автор первой книги по биомеханике «О движениях животных». Эта книга увидела свет в 1679 г.

Другая ветвь истории развития биомеханики связана с ее биологической стороной. Из биологических наук в биомеханике наиболее широко использовались анатомические данные, а затем и закономерности физиологии. Значительный вклад в развитие отечественной биомеханики, и особенно ее физиологического направления, внесли И.М. Сеченов и И.П. Павлов с их учением о нервизме, А.А. Ухтомский и основоположник отечественной биомеханической школы Н.А. Бернштейн. Работами последних двух ученых создана биомеханика труда и спорта.

Функции живого организма изучались с позиций анатомии, физиологии и механики. Исследования в основном были посвящены изучению опорно-двигательного аппарата. Поэтому до последнего времени было принято считать, что биомеханика – это наука о движениях человека и

животных, осуществляемых при помощи опорно-двигательного аппарата.

Только лишь в последние десятилетия, в значительной мере благодаря успехам экспериментальной техники, границы биомеханических исследований расширились. Возникли такие направления, как:

- медицинская биомеханика, изучающая механизмы возникновения травм и их профилактики, деформацию и течение биоматериалов тела, (последнее изучает самостоятельная научная дисциплина «Биореология», а течение крови и деформацию ее элементов исследует «Гемореология»);

- инженерная биомеханика на основе бионики занимается вопросами конструирования подвижных систем, в том числе роботов-манипуляторов;

- эргометрическая биомеханика. Ее предметом исследования является механическое взаимодействие человека с окружающими предметами, для решения задачи оптимизации этого взаимодействия.

Обширен круг биомеханических исследований в области кровообращения. Это изучение упругих свойств стенки кровеносных сосудов и сердца, тщательный анализ текучести крови – неньютоновской жидкости, исследование гидравлического сопротивления кровотоку в сосудах разного калибра, ламинарный и турбулентный потоки.

Биомеханические исследования дыхательного аппарата позволили изучить кинематику и динамику дыхательных движений, эластическое и неэластическое сопротивление в дыхательной системе в целом и ее отдельных частях (легкие, грудная клетка, воздухоносные пути). Все это позволяет определить биомеханику как раздел биофизики, изучающий механические свойства живых тканей и органов, а также механические явления, происходящие в них в процессе жизнедеятельности. Выяснение этих свойств – важнейший этап в изучении живых систем, поскольку только на подобной основе возможно успешно изучать процессы управления функциями организма.

Исследование проблемы прочности в биомеханике связаны с изучением функциональных свойств костной и мышечной тканей, суставного хряща, связок и сухожилий.

Эта содержательная сторона биомеханики раскрывает основные направления в ее развитии.

В XIX столетии одно за другим возникают механическое, физиологическое и функционально-анатомическое направления. В дальнейшем эти направления развиваются параллельно.

Большой толчок в развитии биомеханики дала «Вторая научная революция» – произошел бурный расцвет классической механики (И. Ньютон). Механика проникает всюду и в том числе в изучение движения живых организмов. В механическом направлении заложены главные идеи о применении законов механики в движениях человека и животных и особенно изучалась роль приложенных сил для изменения движения тел. Известными представителями этого направления были Брауне и Фишер в Германии, Е. Марей во Франции и Гильберт в США.

В настоящее время это направление кроме России развивается в ряде зарубежных научных центров Европы и США.

Для объяснения физической природы движений человека производится измерение их механических характеристик. Физика составляет основу данного направления. Она определяется как наука, изучающая строение и свойства конкретных видов материи – веществ и полей – и формы существования материи – пространства и времени. В этом определении нет разграничения живой и неживой природы. С точки зрения физики, раскрывается строение и свойства опорно-двигательного аппарата, а также механические проявления движений человека.

Работами анатомов П.Ф. Лесгафта, М.Ф. Иванниченко и физиолога И.М. Сеченова создано функционально-анатомическое направление в биомеханике. Его основное содержание включает описание движения звеньев тела в суставах, определение топографии работающих мышц при движении и сохранении положения тела. На современном этапе развития функционально-анатомического направления применяются методы электромиографии (регистрация электрической активности мышц), цифровой фото – и видеорегистрации движений с последующим компьютерным анализом изображения. Знание анатомо-физиологических особенностей биомеханического аппарата человека обеспечивает надежное понимание особенностей техники движения в труде и спорте.

Основные эффекторы движения – это скелетные мышцы. Управление их активностью составляет предмет нервно-мышечной физиологии. Данное направление (физиологическое) в отечественной биомеханике формировалось под влиянием идей нервизма И.М. Сеченова, И.П. Павлова, Н.Е. Введенского, А.А. Ухтомского, П.К. Анохина и Н.А. Бернштейна, а также работ зарубежных авторов о моторном контроле над мышечным сокращением со стороны центральной нервной системы [К. Бэгшоу, 1985; А. Brodal, 1969; R. Herman et al., 1970; J. Desmedt, 1973].

Чтобы движения были эффективными, сокращения различных мышц должны правильно синхронизироваться во времени. Несомненно, скоординированная работа мышц происходит в

результате синхронизации двигательных импульсов, генерируемых ЦНС. Исследование этих регуляторных механизмов составляет содержание этого направления исследований в биомеханике.

Современной основой отечественной биомеханики является нейрофизиологическая концепция Н.А. Бернштейна о кольцевом характере движения информации в нервной и мышечной системах. В трудах зарубежных ученых эта концепция о прямой и обратной связях в системе управления типа «мозг → мышца» [L.E. Bayliss, 1966; F.S. Grodins, 1963] логично вытекает из трех рассмотренных направлений: механического, анатомо-физиологического и физиологического. Системно-структурный метод в биомеханике объединяет вышеназванные теоретические подходы в изучении биомеханики движений человека.

Научные направления в современной биомеханике:



Из потребностей практики спорта в нашей стране развилась биомеханика физических упражнений, созданная в середине XIX века П.Ф. Лесгафтом. В 1927 году биомеханика была включена как учебный предмет под названием «теория движений» в учебные планы центрального института физической культуры, а в 1931 году была переименована в учебную дисциплину «биомеханика физических упражнений».

С 1958 года биомеханика как обязательный предмет стала преподаваться во всех институтах физической культуры страны. К этому времени был накоплен опыт преподавания этого предмета в спортивных вузах в Москве, Ленинграде, Тбилиси, Харькове и др. После публикации учебного пособия под ред. Е.А. Котиковой «Биомеханика физических упражнений» глава «Биомеханические обоснования техники движений» стала входить во все учебники по видам спорта.

Бурное развитие спорта во второй половине двадцатого столетия потребовало развития новых технологий в подготовке спортсменов. Не последняя роль в прогрессе спортивной техники принадлежит и биомеханике. Сюда можно включить работы по качественному биомеханическому анализу в гимнастике В.Б. Коренберга, биомеханику выносливости В.М. Зациорского, исследование И.П. Ратовым возможностей управления спортивными движениями с использованием технических средств и «обучающих» тренажеров, изучение энергетического обеспечения и оптимальных режимов циклической мышечной дея-

тельности в работах В.Л. Уткина.

Для координации исследований в области биомеханики создано Международное общество биомехаников, которое регулярно проводит кон-

грессы. Проводимые под эгидой Международного Олимпийского комитета, конгрессы по спортивной медицине включают в программу вопросы медицинской и спортивной биомеханики.

Резюме

История учения о движениях человека и животных насчитывает несколько веков. Она одна из самых старых ветвей биологии. Ее истоками были работы Аристотеля, Архимеда и Галена, посвященные анализу движений животных и человека. Однако только эпоха Возрождения дала самого последовательного биомеханика и одного из самых блистательных людей – Леонардо да Винчи. Он особенно интересовался строением человеческого тела в связи с движением, описал механику тела при переходе от сидения к стоянию, при ходьбе вверх и вниз, при прыжках и, по-видимому, впервые дал описание походок. Многие ученые, стоявшие у истоков биомеханики, – Галилей, Декарт, Ньютон, Бойль, Гук, Эйлер, Гельмгольц, Ван-дер-Поль и др. – внесли решающий вклад в развитие и классической механики. Все это в последующем послужило развитию механического направления в биомеханике. Другая ветвь истории развития биомеханики связана с ее биологической стороной. Из биологических наук в биомеханике наиболее широко использовались анатомические данные, а также закономерности физиологии. Большая заслуга в развитии физиологического направления в биомеханике принадлежит отечественным ученым И.М. Сеченову, А.А. Ухтомскому, Н.А. Бернштейну, П.К. Анохину. Системно-структурное направление в теории биомеханики связано с именем Николая Александровича Бернштейна. Современной основой биомеханики является его нейрофизиологическая концепция о кольцевом характере движения информации в нервной и мышечной системах.

Вопросы для повторения и закрепления материала главы

1. Приведите основные вехи в развитии биомеханики.
2. Место биомеханики как раздела биофизики в системе биологических и физико-математических наук.
3. Основные направления в развитии биомеханики.
4. Сущность механического направления и его представители.
5. Анатомио-физиологическое направление в биомеханике.
6. Физиологическое направление как учение об управлении движениями.
7. Системно-структурный подход в теории биомеханики.
8. Биомеханика физических упражнений на современном этапе

Глава 3. Кинематика и динамика движений человека

3.1. Основные понятия кинематики

Биомеханика рассматривает кинематику и динамику механического движения биологических объектов. *Механическим движением* называется изменение взаимного положения материальных тел и отдельных их точек относительно друг друга. Механическое движение является неотъемлемым компонентом жизнедеятельности любого организма от одноклеточных до человека. Движение человека представляет собой своеобразное отображение всех процессов (биохимических, физиологических, психологических и социальных), происходящих в организме или действующих на него.

Тело человека принадлежит к материальным телам. Материальные тела различны, но их движения обладают многими общими свойствами, и в том числе не зависящими от физических свойств самих тел. Так, например, можно говорить о траектории центра тяжести какого-либо предмета (летающий мяч) и тела человека, не принимая во внимание различий между живыми и неживыми телами. Эти общие свойства механического движения тел и изучаются в общей биомеханике, которая включает кинематику и динамику движений.

В кинематике изучается движение материальных объектов (тело человека, его отдельные части, приводимые в движение спортивные снаряды) без рассмотрения причин, вызывающих или изменяющих это движение. Такое изучение материальных объектов не требует учета их материальных характеристик – массы, приложенных сил, моментов инерции и др.

Движение материального объекта всегда следует рассматривать относительно какого-либо твердого тела – тела отсчета, следовательно, движение является относительным. Для того чтобы зарегистрировать изменение положения тела, необходимо применить какую-либо систему отсчета (рис. 4). В этой связи необходимо сделать существенное дополнение: движение есть изменение положения тела с течением времени относительно неподвижной системы отсчета.

Несмотря на то, что неподвижных тел нет, обычно условно считают неподвижным твердым телом, с которого удобно наблюдать процессы движения, Землю. При решении ряда практических задач биомеханики к неподвижным телам причисляют пол спортивного зала, площадку для спортивных игр, теннисный корт, полотно велотрека и т. д.

Если условно принять, что Земля неподвижна, то движение тела по отношению к этой системе отсчета (по отношению к Земле) условно принимается как абсолютное.



Рис. 4. Система прямоугольных координат при изучении перемещения тела в пространстве и за определенный отрезок времени

При анализе движений в биомеханике рассматривают поступательное и вращательное движения. Поступательным называется такое движение, при котором все точки тела перемещаются по одинаковым линейным траекториям. При вращательном движении точки тела перемещаются по круговым траекториям, центры которых лежат на оси вращения.

В большинстве целостных двигательных актов человека поступательный и вращательный компоненты присутствуют одновременно. Такие движения называют составными. При этом необходимо напомнить, что двигательный аппарат человека устроен так, что движение отдельного биоэлемента (например, предплечья в локтевом суставе) в одном суставе всегда вращательное, а поступательное получается путем суммирования отдельных вращательных движений биоэлементов.

Основными единицами измерения в системе СИ (международная система единиц) являются: метр, килограмм, секунда. Из этих трех основных величин получаются другие единицы. Например, единица скорости (м/с), единица ускорения (м/с^2), единица силы (ньютон, $\text{Н} = \text{кг/м}\cdot\text{с}^2$) и так далее. Наряду с единицами системы СИ в практике биомеханического контроля используют и внесистемные единицы измерения: например, темп движений (частота) может быть измерен числом движений в минуту, а не в секунду, затраченная энергия оценена в килокалориях, а не в джоулях и т. п.

3.1.1. Описание движений человека

Описать положение тела человека можно разными способами. Один из наиболее удобных приемов разработан В.Т. Назаровым (1974). Положение тела человека в пространстве определяется 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.

Вертикальная плоскость, проходящая через переднюю срединную и позвоночные линии, а также всякая плоскость, параллельная ей, называются *сагиттальной*. Она разделяет тело на правую и левую части.

Вертикальная плоскость, проходящая перпендикулярно к сагиттальной, а также всякая плоскость, параллельная ей, называется *фронтальной*. Она разделяет 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.

Движение человека рассматривают как материальную точку, когда перемещение всего тела намного больше, чем его размеры (если при этом не исследуют движение частей тела и его вращение). Тело человека рассматривают как единое твердое тело в том случае, когда можно не принимать во внимание взаимные перемещения его звеньев и деформации органов и тканей (например, при изучении условий равновесия, вращения тела в постоянной позе). Поэтому, определяя основные пространственные характеристики движений или положения тела человека, необходимо заранее уточнить, к какому материальному объекту (точке, телу или системе материальных тел) приравнять в данном случае тело человека.

3.1.3. Пространственные характеристики движения

Изучение кинематики удобно начать с простейшего объекта движения – точки. Только после изучения кинематики точки рационально переходить к изучению движения твердого тела и системы тел.

Важной характеристикой при оценке движения является положение тела или его любой точки (например, любого сустава) или положение спортивного снаряда (например, мяча). Положение определяется координатами в той или иной

их системе. Координаты точки – это пространственная мера местоположения точки относительно системы отсчета. По координатам определяют, где находится изучаемая точка (например, проекция ОЦТ на теле человека). В качестве иллюстрации можно рассмотреть линейные и угловые координаты тела человека (рис. 5).

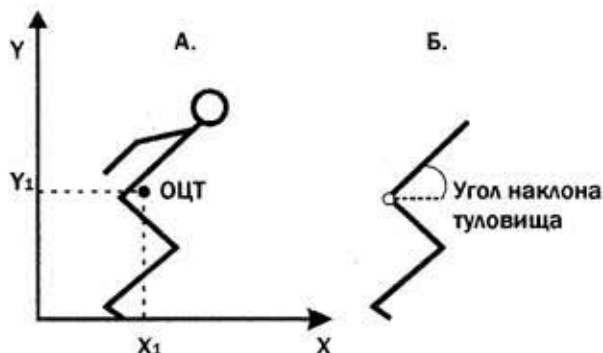


Рис. 5. Координаты положения тела: А – линейные, Б – угловые

В практике нередко сочетают:

- определение местоположения какой-либо точки (например, общего центра массы или точки опоры);
- определение позы (взаимного расположения частей тела относительно друг друга);
- определение ориентации тела (по линии отсчета, проведенной в теле).

Изучая движение, нужно определить:

1. исходное положение, из которого движение начинается;
2. конечное положение, в котором движение заканчивается;
3. ряд мгновенных (непрерывно сменяющихся), промежуточных положений, которые принимает тело при движении.

В кинематике описать движение (найти закон движения) – значит определить положение любой точки системы в любой момент времени. Иначе говоря, определить в любой момент времени координаты пунктов или линий отсчета, отмеченных на теле, по которым изучают его движение в пространстве.

Всякое движение совершается в пространстве и может быть описано комплексом пространственных характеристик. К ним относятся:

- координаты точки, тела и системы тел;
- траектории точки;
- перемещение точки и тела (линейное и угловое).

Траектория точки – это пространственная характеристика движения. Она представляет собой геометрическое место ее последовательных положений в пространстве с течением времени

относительно рассматриваемой системы отсчета (рис. 6). Например, наблюдая полет спортивного снаряда, мы можем представить себе его траекторию (след). На траектории определяют ее длину, кривизну и ориентацию в пространстве, а также перемещение. Расстояние по траектории показывается, каков путь пройден точкой.

По виду траекторий движения точки делятся на прямолинейные и криволинейные. В криволинейном движении (направление его изменяется) путь точки равен расстоянию по траектории в направлении движения от начального положения до конечного.



Рис. 6. Пример анализа траектории движения спортивного снаряда. Показана длина траектории (L), ее высота (H). Стрелкой обозначен радиус (R) траектории, что позволяет определить ее кривизну (k) как $1/R$

Кривизна траектории (k) показывает форму движения точки в пространстве. Чтобы измерить кривизну траектории необходимо определить радиус кривизны R . Кривизна – величина, обратная радиусу:

$$k = 1/R$$

Ориентация траектории в пространстве при одной и той же ее форме может быть разной. Ориентацию для прямолинейной траектории определяют по координатам точек начального и конечного положений; для криволинейной траектории – по координатам этих двух точек и третьей точки, не лежащей с ними на одной прямой линии.

Перемещение точки показывает, в каком направлении и на какое расстояние сместилась точка. Перемещение (линейное) находят по разности координат точки в моменты начала и окончания движения (в одной и той же системе отсчета расстояния):

$$LS = S_{кон.} - S_{нач.}$$

Перемещение определяет размах и направление движения. Перемещение – это не само движение, а лишь его окончательный результат, расстояние по прямой от начального до конечного положения (рис. 6). Перемещение тела при поступательном и вращательном движении измеряется различно. Линейное перемещение тела (в поступательном его движении) можно определить по линейному перемещению любой из его точек. Тогда как угловое перемещение (во вращательном движении) определяется по углу поворота.

При вращательном движении тела в нем имеется линия, все точки которой остаются во время всего движения неподвижными (лежат на оси). Остальные же точки тела движутся по дугам окружностей, центры которых лежат на этой неподвижной линии – оси вращения. Угловое перемещение тела находят по разности угловых координат условной линии отсчета (в одной и той же системе отсчета расстояния).

Любое движение тела в пространстве можно представить как геометрическую сумму его поступательного и вращательного (относительно любого полюса, в частности его центра масс) движений.

В некоторых случаях несколько подвижных частей (например, все кости стопы, кисти, предплечья и даже туловища) рассматриваются как одно звено – тогда можно в общих чертах уловить особенности движений, хотя взаимное движение многих звеньев не учитывается и их деформациями можно пренебречь. Однако получить полную картину перемещений всех основных элементов тела (включая и внутренние органы и жидкие ткани) при существующих методах исследования пока еще невозможно. В любом научном исследовании приходится прибегать к более или менее значительному упрощению или моделированию движений систем.

3.1.4. Временные характеристики движения

Временные характеристики позволяют рассмотреть движение во времени. Можно определить, когда движение началось и закончилось (момент времени), сколько времени оно продолжалось (длительность движения), как часто выполнялись отдельные движения (их темп) и как части движения соотносятся во времени (ритм). При определении положения тела или его точки в пространстве необходимо также установить время нахождения их там.

Момент времени. Данная характеристика определяется как временная мера положения точки тела и системы. Всякий момент времени t определяется числом секунд, которые прошли от какого-то начального момента t_0 до данного. Разность между этими последовательными моментами

($t-t_0$) или какими-либо другими называется *промежутком времени*. Расчет момента времени производят как промежуток времени от него до начала отсчета. Например, спортсмен начал движение (бег на 100 метров) с 5-й секунды на секундомере, следовательно, моментом времени, соответствующим началу движения, будет 5-я секунда (промежуток времени от момента начала бега до системы отсчета – от 5-й секунды на секундомере). Характеристику «момент времени» используют в практике биомеханического анализа, когда необходимо определить во времени моменты существенного изменения движения. Например, отрыв стопы от опоры – это момент окончания отталкивания в беге и начало периода переноса. По моментам времени измеряют длительность движения.

Длительность движения (промежуток времени). Эту характеристику определяют как разность между началом и окончанием движения (разность между конечным и начальным моментами времени):

$$dt = t_{\text{кон.}} - t_{\text{нач.}}$$

Длительность движения (dt) является промежутком времени между двумя моментами, которые ограничивают движение. Если известна длительность движения (или его частей), то можно определить темп и ритм.

Темп. Временная мера повторности движения называется темпом. На практике темп определяют как количество движений в единицу времени (частота движений):

$$T = 1/t \quad (c^{-1} = 1/c),$$

где T – темп движения.

Размерность темпа – единица, деленная на секунду (c^{-1}) или движение в секунду (иногда в минуту). Например, 60 гребков в минуту в плавании кролем, 200 шагов в минуту в спортивной ходьбе и т.п. Темп – величина обратная длительности движений. Чем больше длительность каждого одиночного движения, тем меньше темп, и наоборот. В циклических (повторяющихся) движениях темп может служить показателем совершенства техники. Например, частота движений у лыжников, пловцов, бегунов, велосипедистов высокой квалификации (при более высокой скорости передвижения) больше, чем у менее подготовленных спортсменов. Известно, что при утомлении темп движений изменяется: он может снижаться или повышаться из-за изменения длины шага. Следовательно, проблемой спортивной техники является выработка оптимальных вариантов соотношения между темпом и длиной шага.

Ритм. Эта характеристика движений определяет временное соотношение его частей. Например, соотношение времени опоры и времени полета в цикле бегового шага (рис. 7). С изменением темпа движений меняется, и соотношение его частей во времени, то есть его ритм.

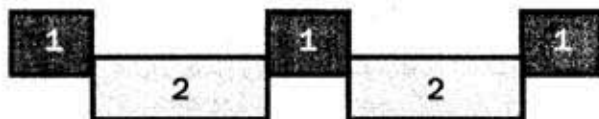


Рис. 7. Пример ритмограммы: временное соотношение длительности опоры (1) и полета (2) в структуре бегового шага

Чтобы определить ритм, выделяют фазы, которые различаются по задаче движения, его направлению, скорости, ускорению. Ритм, как кинематическая характеристика движения, тем не менее отражает прилагаемые усилия, зависит от их величины, времени приложения и других особенностей движения. По ритму можно судить об эффективности и совершенстве движений. При анализе ритма особенно важно выделить акценты – большие усилия и ускорения – их размещение во времени. При освоении новых движений иногда лучше сначала задать ритм, чем подробно описывать детали движений, это помогает быстрее понять особенности изучаемого движения, построение его временной структуры.

Необходимо иметь в виду, что в каждом движении есть различающиеся части, например, подготовительные и исполнительные (основные) движения, разгон и торможение. Значит, ритм можно определить для каждого упражнения. Так называемые «неритмичные» движения – это не вообще лишённые ритма движения, а движения с отклонениями от заданного рационального ритма. Иначе говоря, неритмичные движения – это движения без определенного постоянного ритма или с неправильным, нерациональным ритмом.

3.1.5. Пространственно-временные характеристики

Пространственно-временные характеристики служат для определения изменений положений тела в пространстве и во времени. То есть отвечают на вопрос, как быстро человек изменяет свое положение (скорость) в пространстве и как изменяются его движения (ускорение).

Скорость. Одной из основных характеристик движения точки или тела является скорость относительно выбранной системы отсчета. На практике это отношение пройденного телом (или точкой) пути к затраченному на это движение времени. Кроме того, можно заключить, что скорость – это быстрота изменения положения тела в пространстве:

$$V = S/dt, \text{ или } V = \text{длина/время},$$

где V – скорость, S – пройденный путь, dt – длительность движения.

Скорость – величина векторная, она характеризует быстроту движения и его направление. При прямолинейном движении вектор скорости точки направлен по траектории. В криволинейном движении – по касательной к траектории в каждой рассматриваемой точке (рис. 8).



Рис. 8. Направление вектора скорости поступательного (1) и вращательного (2) движения

При поступательном движении тела линейные скорости всех его точек одинаковы по величине и направлению. При вращательном движении определяют угловую скорость тела как меру быстроты изменения его углового положения (быстрота поворота на какой-либо угол). Угловая скорость равна по величине первой производной по времени от углового перемещения (или отношению угла поворота тела ко времени этого перемещения):

$$\omega = \varphi / dt,$$

где ω – величина угловой скорости (омега), φ – изменение угла (величина углового перемещения), dt – время движения (или его длительность).

Чем больше расстояние от точки тела до оси вращения (то есть чем больше радиус), тем больше линейная скорость точки. Скорость вращательного движения твердого тела равна отношению линейной скорости каждой точки к ее радиусу (при постоянной оси вращения).

Ускорение. Движение точки или всего тела с постоянной скоростью происходит тогда, когда силы, приложенные к точке, взаимно уравновешиваются. Однако подобного рода движение встречается не так часто. В большинстве случаев скорость не остается постоянной. Изменение скорости может происходить либо по модулю (величине), что соответствует неравномерному прямолинейному движению, либо одновременно по модулю и направлению (неравномерное криволинейное движение). Величина, характеризующая быстроту изменения скорости (по модулю и направлению) называется ускорением. В зависимости от выбранной системы единиц ускорение

измеряется как отношение скорости ко времени:

$$a = V/t, \text{ а } a = \text{длина/ время}^2$$

Угловое ускорение тела определяется как мера быстроты изменения его угловой скорости. Оно равно отношению угловой скорости ко времени ее изменения:

$$\varepsilon = \omega/dt$$

Иногда для оценки движений имеется необходимость определить величину линейного ускорения точек вращающегося тела. В этом случае необходимо найти произведение углового ускорения на радиус вращения данной точки (например, ОЦМ):

$$a = \varepsilon \cdot r,$$

где ε – угловое ускорение,
 r – радиус вращения.

При рассмотрении циклически повторяющихся движений в пространстве можно рассчитывать среднюю скорость (V) перемещения как произведение длины одиночного шага (L , м) на частоту выполнения шагательных движений, то есть на темп (T – темп, c^{-1}):

$$V = L \cdot T \text{ (м/с)}$$

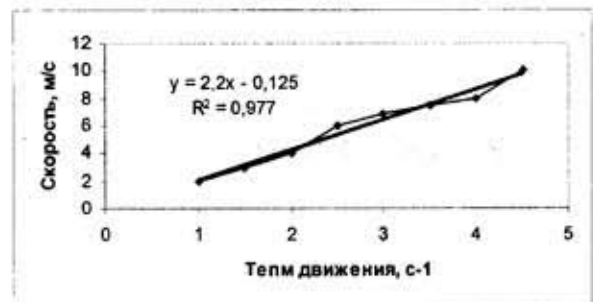


Рис. 9. Зависимость скорости бега от темпа движения. Из уравнения регрессии ($y = 2,2x - 0,125$; $R^2 = 0,977$) следует, что между скоростью бега (y) и его темпом (x) имеется практически линейная зависимость с достоверностью аппроксимации 0,977

Такой подход в оценке скорости дает возможность на практике оптимизировать длину шага и темп для достижения высокой скорости передвижения, используя уравнение регрессии для предсказания необходимой скорости при заданных величинах темпа и/или длины одиночного шага (рис. 9; точечная диаграмма Microsoft Excel). В данном случае становится очевидной пропорциональная зависимость скорости циклических локомоций (бега, ходьбы, плавания, гребли, бега на коньках и лыжах) от темпа и/или длины шага их выполнения.

Резюме

Кинематика как раздел механики, изучающий движения без учета сил и действующих масс, оперирует такими понятиями, как путь тела или точки, перемещение, скорость и ускорение. В кинематике рассматриваются системы отсчета, и подчеркивается в этой связи относительность движения.

Все движения в кинематике изучаются как поступательные, и как вращательные. Эти два вида движений измеряются разными характеристиками: линейными и угловыми. Кинематическое описание движений включает их характеристику в пространстве и во времени. В первом случае рассматривают положение тела, его ориентацию и если тело представляет собой систему звеньев, то их взаимное расположение, которое характеризуется позой. Движение тела и его частей совершается по траекториям. Траектория, как пространственная характеристика движения, представляет собой геометрическое место ее последовательных положений в пространстве с течением времени относительно рассматриваемой системы отсчета. На траектории определяют ее длину, кривизну и ориентацию в пространстве, а также перемещение. Расстояние по траектории показывает, каков путь пройден точкой или телом. Путь измеряют в метрах (или в километрах, сантиметрах). При оценке угловых перемещений тела, используют величину угла поворота. Измерения производят в градусах, радианах или их долях (секундах и минутах, а иногда в оборотах).

Оценка эффективности движения во времени проводится на основе измерения временных характеристик. К ним относятся моменты времени, длительность движения, темп и ритм. В практике наиболее часто используется понятия темпа и ритма движения.

Движения совершаются в пространстве и во времени, следовательно, их можно оценить по пространственно-временным характеристикам. Последние включают скорости и ускорения. При этом рассматривают линейные скорости и ускорения и угловые, анализируют их взаимосвязи.

Вопросы для повторения и закрепления материала главы

1. Основные понятия кинематики.
2. Определение положения материальной точки и тела в пространстве.
3. Поступательное и вращательное движения в кинематике.
4. Значение пространственных характеристик для анализа движений.
5. Линейные и угловые характеристики движения точки или тела.
6. Дать определение временным характеристикам.
7. Относительность движения, системы отсчета.
8. Движение человека и его звеньев во времени и пространстве – место, ориентация и поза.
9. Анализ пространственно-временных характеристик поступательного и вращательного движения.
10. Сложное движение – комплекс вращательных и поступательных элементарных движений.

Глава 4. Динамика движений человека

4.1. Основные понятия динамики

Знание общих законов механики является необходимым условием всестороннего познания двигательной деятельности человека. Курс основной биомеханики наряду с кинематикой включает динамику. Она изучает механическое движение в связи с силами, приложенными к движущимся объектам.

При поступательном движении все точки тела движутся одинаково и для определения движения тела достаточно знать движение какой-либо одной его точки, например, общего центра массы. Поэтому тело, движущееся поступательно можно рассматривать в динамике как точку, находящуюся в центре тяжести тела, имеющую массу, равную массе этого тела.

4.2. Основные законы динамики

Основные законы механики представляют собой результат обобщений вековых наблюдений за движениями тел. Эти законы были изложены Исааком Ньютоном (1643-1727).

Первый закон (закон инерции). Этот закон гласит: изолированная от внешних воздействий материальная точка сохраняет свое состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения до тех пор, пока приложенные к ней силы не заставят ее изменить это состояние.

Движение, совершаемое точкой или телом при отсутствии сил, называется *движением по инерции*. Закон инерции указывает на одно из основных свойств материи – пребывать неизменно в движении. Состояние покоя рассматривается как частный случай движения (скорость равна нулю) по инерции.

Мы наблюдаем, что любое тело, как будто бы предоставленное самому себе, постепенно уменьшает скорость и, наконец, останавливается (например, футбольный мяч после удара по нему ногой). Это кажущееся противоречие закону инерции объясняется различными внешними влияниями на движение данного тела: сопротивление воздуха, трение о поверхность, по которой совершается движение и т. п. Эти факторы и способствуют замедлению движения тела. Если уменьшить сопротивление движению, то оно будет приближаться к равномерному.

На практике нельзя конечно полностью изолировать материальное тело от воздействия на него окружающих тел. Поэтому для поддержания

движения тела к нему необходимо приложить какую-либо силу (F). Возможны три случая проявления взаимодействия приложенной силы и величины сопротивления: 1) если приложенная сила будет меньше силы сопротивления, то движение будет замедляться; 2) при большей величине приложенной силы произойдет его ускорение и 3) если же величины этих сил будут равны, то скорость тела останется неизменной. В последнем случае говорят о взаимном уравнивании приложенных сил.

Таким образом, можно сделать следующее заключение: всякое тело, находящееся под действием взаимно уравновешенных сил, сохраняет свою скорость неизменной. Следовательно, сохранение телом состояния своего движения (в частности, покоя) неизменным при отсутствии действия на него сил (или в случае их равновесия) называется инерцией тела.

Второй закон (основной закон динамики). Ускорение материальной точки пропорционально приложенной к ней силе и совпадает с ней по направлению. В другой формулировке этот закон звучит так: произведение массы тела (m) на ускорение (a), которое оно приобретает, равно модулю силы (F), которая создает данное ускорение:

$$ma = F$$

Необходимо обратить внимание на то, что, по второму закону, с направлением силы совпадает направление ускорения, а не направление самого движения. Так, например, тело, брошенное под углом к горизонту, движется по кривой линии (парабола), все время изменяя направление своего движения, в то время как действующая на тело сила тяжести и сообщаемое ею ускорение всегда направлены по вертикали вниз.

Из повседневного опыта известно, что одна и та же сила сообщает различным телам неодинаковые ускорения. Модуль (величина) ускорения зависит не только от действующей силы, но и от массы тел. *Массой тела* называется мера его инертности, численно равная отношению величины силы, действующей на тело, к вызванному ею ускорению.

Обозначая массу тела через m , силу тяжести через G и ускорение свободного падения g , будем иметь:

$$m = G/g$$

В данном случае рассматривается инерционная масса тела как мера его сопротивления ускоряющему действию силы (G).

Третий закон (закон равенства действия и противодействия). Этот закон сформулирован таким образом: силы, с которыми действуют друг на друга тела, всегда равны и направлены по одной прямой в противоположные стороны. Равенство действия и противодействия имеет место, например, при ударе по мячу, рука ударяет по мячу, а сила противодействия со стороны мяча действует на руку (рис. 10).

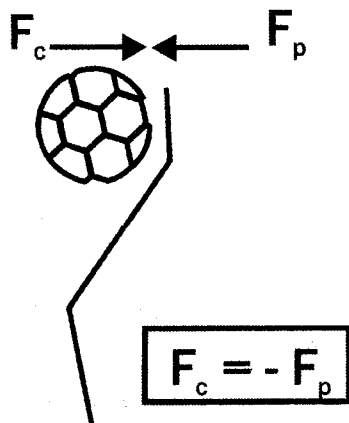


Рис.10. Равенство сил ($F_c = -F_p$) на примере удара по мячу рукой

4.3. Понятие силы (равенство действия и противодействия)

Человек ощущает мускульные усилия, перемещая какое-либо тело с одного места на другое, при изменении его скорости и т.п. По аналогии с этим, силой называют всякое действие одного тела на другое, в результате которого тело изменяет свое механическое состояние.

Если изменение состояния тела выражается в изменении скорости его движения, то говорят о динамическом проявлении силы. При медленной деформации тела проявляется статическое действие силы.

Действие силы на тело определяется:

1. точкой приложения силы,
2. направлением силы и численным значением (модулем) силы, которое находят путем ее сравнения с некоторой другой силой, принимаемой за единицу.

За единицу силы в практике и в технической системе единиц принимается килограмм, то есть вес международного эталона, равный весу одного кубического дециметра чистой воды при 40°C на уровне моря и на широте 45°.

В международной системе единиц (СИ) за единицу силы принимается сила, называемая ньютоном (н).

$$1 \text{ кг} = 9,8 \text{ н, или } 1 \text{ н} = 0,102 \text{ кг}$$

Приборы, служащие для измерения силы, называются динамометрами. Принцип действия динамометра основан на том, что до известных пределов деформации упругого элемента (пластины) или растяжение пружины пропорциональны силе, вызывающей их.

Инертность. Это свойство физических тел, проявляющееся в постепенном изменении скорости со временем под действием сил. Мерой инертности при поступательном движении является масса тела. Инерционные характеристики указывают на особенности тела.

При выполнении вращательного движения мерой инертности является момент инерции. Эта характеристика (J) равна сумме произведений масс всех материальных точек тела на квадрат расстояния их от данной оси:

$$J = \sum m R^2,$$

где $\sum m$ — сумма масс тела, R — радиус инерции (расстояние от оси вращения до центра массы тела)

Если части тела могут перемещаться относительно друг друга (изменение позы), то радиус инерции изменяется, что ведет к изменению момента инерции как величины сопротивления вращению.

Радиус инерции измеряется корнем квадратным из отношения момента инерции к массе тела:

$$R = \sqrt{J/m}$$

Определение момента инерции очень важно для понимания движений (механизм вращательных движений), хотя точное количественное измерение этой величины в конкретных случаях нередко затруднено.

Знать величину момента инерции как меры инертности тела при вращательном движении необходимо при биомеханическом анализе техники движений. Это связано с тем, что движения звеньев тела человека в суставах близки к вращательным, и для их количественной оценки необходимо знать величину момента инерции. В тех видах спорта, где широко применяются вращательные движения (в гимнастике, акробатике, фигурном катании, метаниях и др.), величину момента инерции тела можно определить как расчетным путем, так и экспериментально.

Для расчета момента инерции требуются данные о распределении масс биозвеньев тела человека. Их можно получить, используя таблицы Фишера или регрессионные модели [Д.Д. Донской, В.М. Зацюрский, 1979].

Существует достаточно большое число методов экспериментального определения моментов инерции тела, фиксированного в определенной позе. Наиболее удобным в учебной практике является метод физического маятника.

Движение (ускорение), которое приобретает тело, обратно пропорционально его инертности и прямо пропорционально воздействующей силе. Следовательно, движение тела происходит под действием приложенной силы. Сила – это мера механического действия одного тела на другое. Численно она равна произведению массы тела на ускорение:

$$\text{Сила} = \text{масса} \cdot \text{ускорение}, F = ma$$

Несмотря на то, что чаще всего говорят про силу и результат ее действия – это применимо только к простейшему поступательному движению тела. В движениях тела человека как системы, где все движения частей тела вращательные, изменение этого движения зависит не от силы, а от ее момента.

Если некоторое тело будет вращаться около точки *O* (рис. 11), чтобы привести его во вращательное движение, нужно приложить силу *F*. В том случае, если она будет направлена вдоль линии, проходящей через ось *O*, движения (вращения) не произойдет, так как эта сила будет уравновешена реакцией опоры (оси). Если сила *F* будет иметь какое-либо другое направление, то она вызовет вращение тела. Мерой действия силы, вызывающей вращение тела служит момент силы.

Таким образом, можно заключить, что *момент силы* – это мера вращательного действия силы. Он определяется произведением модуля силы (*F*) на ее плечо (плечо силы, *d* – кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы):

$$M = F \cdot d,$$

где *d* – плечо силы *F*

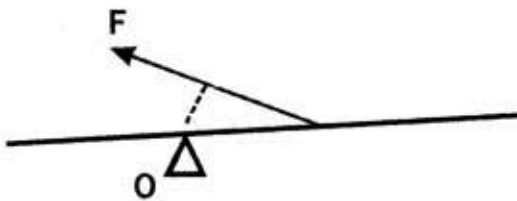


Рис. 11. иллюстрирует понятия рычага, приложенных сил и их плечи. Прерывистой линией обозначено плечо (*d*) силы *F* относительно оси вращения рычага (*O*)

Момент силы считается положительным, когда сила вызывает поворот тела против часовой стрелки, и отрицательным – при повороте по часовой стрелке (со стороны наблюдателя).

Алгебраическую сумму моментов всех приложенных к телу активных сил относительно оси *z* вращения тела, принято называть вращающим

моментом и обозначать через $M_{вр}$.

$$M_{вр} = \sum mz (Fk.)$$

Для тела, вращающегося вокруг неподвижной оси, вращающий момент равен моменту инерции (*J*) тела относительно этой оси, умноженному на угловое ускорение тела (*ε*).

$$M_{вр} = J \cdot \epsilon$$

Если вращение тела происходит около определенной оси, то для него момент инерции есть величина постоянная. Поэтому если и вращающий момент тоже постоянен, то угловое ускорение будет величиной постоянной, то есть тело совершает равномерно-переменное вращение как, например, большие обороты гимнаста на перекладине (рис. 12).

Моменты сил измеряют в килограммометрах (кгм) или в ньютон-метрах (нм).

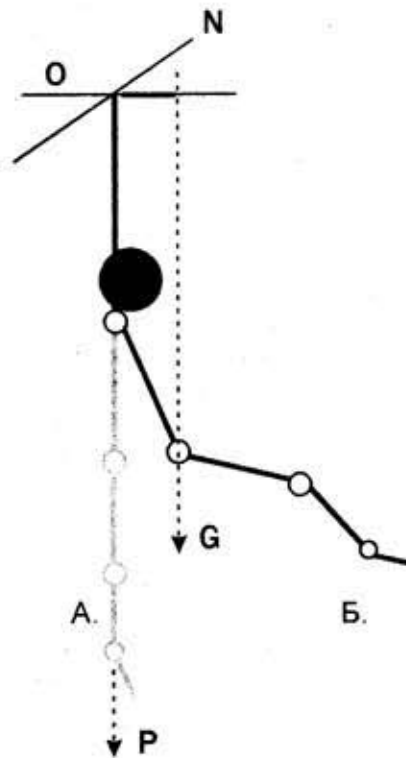


Рис. 12. Действие сил вдоль длинной оси тела, по нормали (действие веса тела, А) и под углом к нему (сила тяжести *G* создает момент относительно оси *O* и отрезок *ON* – плечо силы тяжести)

Тяга каждой мышцы образует момент силы относительно оси соответствующего сустава. Силы, извне приложенные к телу во время движения, обычно не проходят через его центр масс, так что возникают моменты сил относительно центра масс (ЦМ). Силу, не проходящую через точку в твердом теле можно привести к этой точке.

Измерение или расчет силы, или ее момента, если известна масса или момент инерции, дает возможность получить только ускорение, то есть понять, как быстро изменяется скорость. Однако для определения рабочего эффекта, приложенной к телу силы, необходимы другие подходы. Для этого должно быть известно, как долго была приложена сила или ее момент. Иначе говоря, следует определить импульс силы (или момент импульса).

Закономерность связи времени действия силы и ее величины (модуля) легко наблюдать в повседневной жизни. Например, чтобы хорошо разогнать какой-либо спортивный снаряд и придать ему высокую скорость движения (например, сани в санном спорте), надо достаточно долго его толкать. Из этого следует, что эффект действия силы (прирост скорости) зависит не только от величины силы, но и от продолжительности ее действия (Δt).

В связи со сказанным для биомеханического анализа используются такие характеристики, как импульс силы ($F\Delta t$) и импульс момента силы ($M\Delta t$). Импульс силы – это мера воздействия силы на тело за данный промежуток времени (при поступательном движении), численно он равен произведению модуля силы (F) на продолжительность ее действия (Δt):

$$Si = F \cdot \Delta t$$

Что касается вращательного движения, то момент силы, действуя в течение определенного времени, создает импульс момента силы (Sz). Импульс момента силы – это мера воздействия момента силы относительно данной оси за данный промежуток времени (во вращательном движении):

$$Sz = M \cdot \Delta t$$

При действии на тело импульса силы или импульса момента происходит изменение движения, зависящее от инерционных свойств тела и проявляющееся в изменении скорости (или количества движения либо кинетического момента).

4.4. Геометрия масс тела

Тело человека представляет собой комплекс элементов – биомеханических звеньев, которые имеют определенную длину и массу. Вся эта система звеньев образует двигательный аппарат человека, который образован более чем 600 мышцами и 246 костями. Распределение масс между звеньями тела и внутри звеньев называется *геометрией масс* (рис. 13). В более широком смысле слова под геометрией масс в биомеханике принято понимать совокупность показателей, ха-

рактеризующих распределение массы в теле человека (массы, моменты инерции отдельных сегментов тела и всего тела в целом, координаты центров масс, радиусы инерции отдельных сегментов и т. п.).

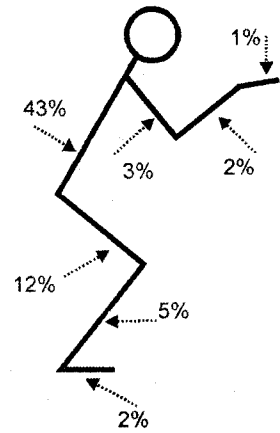


Рис. 13. Распределение массы по отдельным звеньям тела (в процентах от массы всего тела, принятой за 100%)

Для биомеханических расчетов нужны точные сведения о масс-инерционных характеристиках частей (сегментов) тела. Для этого применяются разные методы и в том числе математическое моделирование, где используют геометрические фигуры как аналоги сегментов тела человека (цилиндры, усеченные конусы, эллипсоиды и т. п.). В настоящее время стала популярной пятнадцатизвенная модель тела человека, предложенная Napanav (1964). Эта модель позволяет определить положения ОЦМ и моменты инерции при любых положениях звеньев (рис. 13).

Масса (m) – это количество вещества (в килограммах), содержащееся в теле или в отдельном звене (например, в предплечье, стопе и т. д.). Вместе с тем необходимо помнить, что масса – это количественная мера инертности тела по отношению к действующей на него силе. Чем больше масса, тем инертнее тело и тем труднее его вывести из состояния покоя или остановить какой-либо приложенной силой.

Измерение массы тела производится с достаточной точностью для решения практических задач биомеханики путем сравнения (уравновешивания) массы тела с эталонными массами на рычажных весах.

Центр тяжести тела. Одной из важнейших характеристик движущегося тела является центр его тяжести. Однако прежде чем говорить о центре тяжести, необходимо остановиться на понятии центра параллельных сил. Точка, через которую проходит линия действия равнодействующей системы параллельных сил при любых поворотах этих сил около их точек приложения в одну и ту же сторону и на один и тот же угол, называется центром параллельных сил (рис. 14).

При любом повороте тела (рис. 14 Б.) силы остаются приложенными в одних и тех же точках, параллельными друг другу и сохраняют свое

направление. Эта точка называется центром тяжести тела. Иными словами *центр тяжести твердого тела* есть неизменно связанная с этим телом точка, через которую проходит линия действия равнодействующей сил тяжести частиц данного тела при любом его положении в пространстве.

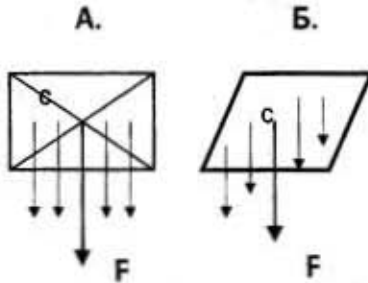


Рис. 14. Силы, действующие на отдельные частицы твердого тела (стрелки) могут быть заменены одной их равнодействующей F , модуль этой силы равен весу тела. Точка C – центр параллельно действующих сил, приложенных в точку, которая является центром тяжести этого тела

Данное определение центра тяжести тела позволяет найти его расчетным путем в теле человека при геометрическом сложении центров тяжести отдельных биозвеньев (отмечены стрелками на рис. 15).

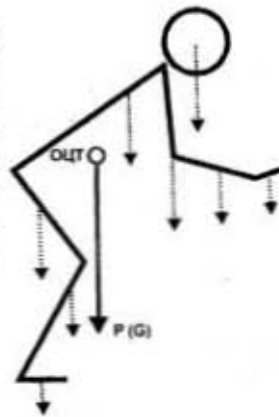


Рис. 15. Определение общего центра тяжести (ОЦТ) тела путем геометрического сложения ЦТ отдельных биозвеньев

Таким образом, центром тяжести называется точка, где пересекаются линии действия всех сил, приводящих тело к поступательному движению и не вызывающих вращения тела. В поле силы тяжести (гравитационной силы) центр масс совпадает с центром тяжести. Положение отдельных звеньев формирует позу тела, следовательно, локализация ОЦТ зависит от позы человека.

О центре тяжести человека

Определение положения общего центра тяжести (ОЦТ) тела человека важно для решения вопросов механики спортивных движений. Так, по положению ОЦТ судят об устойчивости в гимнастике, акробатике, спортивной борьбе. По по-

ложению центра тяжести судят об устойчивости равновесия. Знание расположения ОЦТ тела дает возможность оценить степень рациональности движений. Кроме того, положение общего центра тяжести зависит от распределения масс тела и служит одним из показателей соматических особенностей спортсмена. Дело в том, что у разных людей при одинаковых линейных размерах тела положение центра тяжести может быть различным в зависимости от удельного веса тех или иных тканей и органов. Когда речь идет о центре тяжести тела человека, фактически подразумевается не геометрическая точка, а сфера, в которой эта точка непрерывно перемещается. Это перемещение обуславливается процессами кровообращения, дыхания, пищеварения, мышечного тонуса и др. Ориентировочно можно считать, что диаметр той сферы, внутри которой происходит постоянное перемещение ОЦТ, при спокойном положении тела, равняется 10 мм. В процессе движений он значительно увеличивается, и смещение его может оказать влияние на технику выполнения упражнений.

В биомеханике используют как расчетные, так и экспериментальные методы определения координат ОЦТ тела человека в фиксированной позе.

Центр массы (или центр тяжести) системы может менять свое положение, если изменяются расстояния между точками этой системы.

У человека, стоящего в основной стойке, горизонтальная плоскость, проходящая через ОЦМ, находится примерно на уровне второго крестцового позвонка. В положении лежа ОЦМ смещается в сторону головы примерно на 1%; у женщин он расположен в среднем на 1-2% ниже, чем у мужчин; у детей он существенно выше, чем у взрослых (например, у годовалых детей в среднем на 15%).

Одним из наиболее простых экспериментальных методов является взвешивание человека в избранной позе на специальной платформе, имеющей три точки опоры. Одна из них покоится на неподвижном основании, а две другие – на весах.

Наиболее часто пользуются расчетными методами. Например, можно рассчитать положение ОЦМ у стоящего мужчины по следующему уравнению регрессии:

$$Y = 11,066 = 0,675 x_1 - 0,173 x_2 - 0,289 x_3,$$

где: Y – высота положения ОЦМ над опорой (см), x_1 – длина тела, x_2 – обхват голени, x_3 – длина корпуса.

В специальной литературе приводятся подробные данные о расчетных методах определения ОЦМ [В.М. Зацюрский и др., 1981].

В теле человека насчитывается около 70 биозвеньев. Но столь подробного описания геометрии масс для анализа подавляющего большинства движений не требуется. Для решения задач биомеха-

ники достаточно 14-звенной модели человеческого тела. Понятно, что эти крупные звенья тела состоят из более мелких, например, звено кисти анатомически состоит из костей запястья, фаланг пальцев и т. п. Поэтому такие укрупненные звенья правильнее называть сегментами тела.

4.5. Силы в движениях человека

Силы, действующие на тело человека, делят на внешние и внутренние относительно него. Внешние силы вызваны действием внешних для человека тел (например, опора, снаряды, в спорте это противники, партнеры, среда и т. п.). Важно обратить внимание на то, что изменение движения тела (поступательное или вращательное) возможно только при наличии внешних сил или их моментов.

Относительно тела внутренние силы являются результатом взаимодействия его частей друг с другом. Они сами по себе не могут изменить движения тела, его общего центра массы (ОЦМ) или центра масс отдельных биозвеньев. Они сами не могут способствовать перемещению тела относительно внешних тел (как системы отсчета). Вместе с тем, только внутренними силами тяги мышц человек управляет непосредственно, вызывая движения отдельных звеньев и биомеханических пар, и в конечном итоге перемещением всего тела в целом.

Необходимо иметь в виду, что разделение сил, приложенных к телу человека, на внешние и внутренние, условное. Всегда надо ставить вопрос: по отношению к какому телу или какой системе тел делается это разделение? В биомеханике такой системой, естественно, считается тело человека. При проведении биомеханического анализа действующих сил, бывает целесообразно расширить систему (например, гребец – лодка) или ее лимитировать (например, тело гимнаста при выполнении упражнений можно рассматривать как две связанные подсистемы – верхнюю и нижнюю половины тела по весу; тяги мышц, соединяющих эти подсистемы, можно рассматривать как внешние для них силы).

В теоретическом и практическом плане важно иметь в виду, что силы, которые действуют извне на тело человека, путем прямого контакта с ним называются *контактными силами*. С другой стороны, такие силы, как силы тяжести и инерции могут действовать на тело человека без прямого контакта. Источник возникновения этих сил находится на некотором расстоянии от тела человека. Эту группу внешних сил называют *дистантными* (*distantia* – лат. расстояние) силами.

Группа внешних сил включает силы инерции внешних тел, силу тяжести и вес, силу упругой деформации, силу реакции опоры, силы напора среды, силы трения.

Силы инерции внешних тел

Как было сказано выше, внешние силы изменяют движения ОЦМ тела человека. Возникающее в результате их действия ускорение, сопровождается появлением силы инерции (например, разгон автомобиля сопровождается возникновением силы, действующей на тело пассажира в противоположном, ускорению, направлении). Определить силу инерции можно как реальную силу, как меру действия на тело человека со стороны внешнего ускоряемого тела. Численно она равна массе ускоряемого тела, умноженная на его ускорение:

$$F_u = -m \cdot a$$

Из повседневной практики ясно следует, что сила инерции внешнего тела (например, ощущение нарастания давления на руку толкаемого спортивного снаряда) при его ускорении направлена в сторону, противоположную ускорению. Она приложена в месте контакта с ускоряемым телом, в рабочей точке звена, биопары или всего тела человека.

В этих условиях ускорение может быть положительным; человек увеличивает скорость, например, ядра, толкая его от себя. Тогда сила инерции ядра воспринимается как сопротивление. Ускорение может быть отрицательным; например, при уменьшении скорости при ловле набивного мяча. В этом случае сила инерции мяча воспринимается как его напор.

Отягощения, применяемые в спортивной практике, действуют не только своим весом, но и вполне реальной силой инерции, если тренировочному снаряду, имеющему статический вес, придается ускорение. Согласно принципу эквивалентности гравитация (тяготение) и инерция (ускорение) по эффекту в практической деятельности неразличимы.

Сила упругой деформации

В элементарных курсах физики рассматривается упругость твердых тел, например, стали, и вязкость жидкостей, например, воды. Материалы, из которых построено тело животного или человека, обладают совсем иными, более сложными свойствами. Это связано с наличием в них длинных гибких молекул. Важнейшим структурным материалом в теле служат белки (например, коллаген), полисахариды (хитин и др.) и минеральные соли (например, углекислый кальций). Все это полимерные соединения; их большие молекулы построены из множества более мелких, сходных единиц. Резины и пластмассы также представляют собой высокополимерные вещества.

Если растягивать резиновую ленту и держать ее в растянутом состоянии, в ней действуют силы,

которые стремятся восстановить ее первоначальную длину. Если сгибать лезвие ножа и держать его согнутым, в нем действуют силы, стремящиеся снова выпрямить его. В обоих случаях величина упругих восстанавливающих сил зависит от степени деформации тел и материала, из которого они сделаны. Влияние материала выражают соответствующим модулем упругости. Для разных типов деформации предложен ряд различных модулей. Наиболее известен модуль Юнга, характеризующий эффекты растяжения или сжатия того или иного материала вдоль одной оси.

Известно, что под действием приложенных сил тела либо приобретают ускорение (динамическое действие силы), либо деформируются (статический эффект). Реальные физические тела под действием приложенных сил деформируются (рис. 16).



Рис. 16. Сила упругой деформации, (F_y) возникающая в результате продольного сжатия тела

Силы, возникающие в теле, противодействующие изменению формы, затем восстанавливающие ее, называются *упругими*. Для наблюдения деформации иногда на поверхности тела рисуют сетку, и о деформации тела судят по тем изменениям, которые испытывает эта сетка. Основными видами деформации тела является продольное растяжение и сжатие, скручивание и изгиб. Если при устранении внешних сил деформация исчезает, то тело называется упругим. Например, сжатая стальная пружина после удаления внешней деформирующей силы практически полностью восстанавливает свою исходную длину.

Таким образом, можно определить, что сила упругой деформации является мерой действия деформированного тела на другие тела, вызывающие эту деформацию. Необходимо иметь в виду, что величина упругой силы ($F_{упр}$) зависит от свойств деформированного тела, а также от вида и величины деформации.

$$F_{упр} = \mu \Delta L,$$

где, ΔL – величина деформации тела, μ – коэффициент жесткости (коэффициент жесткости или упругости равен отношению силы, к вызванной ею деформации тела: $\mu = F/\Delta L$).

Возникающие в упруго деформируемом теле силы приводят к остановке деформации. При этом была совершена работа, передана энергия деформированным внешним телам (потенциальная энергия упругой деформации). После прекращения действия деформирующей силы, потенциальная энергия упругой деформации переходит в кинетическую энергию движущегося тела. В этом случае сила деформированного тела совершает положительную работу.

Покрывтия беговых дорожек, спортивных площадок, конструкции спортивных снарядов обладают определенной жесткостью (жесткость материала – мера его сопротивления деформирующим нагрузкам), что позволяет использовать силы упругой деформации при амортизации и отталкивании.

Сила тяжести и вес

Все тела на Земле, по закону всемирного тяготения испытывают ее притяжение. Мерой этого притяжения является сила тяжести. Она численно равна произведению массы (m) тела на величину ускорения свободного падения (g):

$$G = m \cdot g$$

В свою очередь, сила тяжести зависит от массы Земли и притягиваемого ею тела, а также от расстояния между ними. Вследствие вращения Земли вокруг своей оси, тела на ее поверхности испытывают действие центробежной силы инерции. Она больше всего на экваторе и уменьшается там силу тяготения на 0,3% по сравнению с положением на полюсах. В строгом смысле слова, сила тяжести равна геометрической сумме сил тяготения (гравитационной) и центробежной (инерционной) силы.

Силы, вызванные притяжением и вращением Земли, действуют на каждое звено тела и на все тело в целом. Равнодействующая параллельных сил тяжести тела приложена к его центру тяжести. 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 (нижнюю или верхнюю) измеряется весом тела.

Вес тела – это мера воздействия тела в покое на опору, которая мешает его падению. Таким образом, сила тяжести и вес тела – не одна и та же сила. Вес всего тела человека всегда приложен не к нему самому, а к его опоре (или подвесу), сила тяжести приложена к центру тяжести тела (человека).

При выполнении движения тела с ускорением по вертикали возникает вертикальная сила инерции. Она направлена в сторону, противоположную ускорению. В том случае, если она на-

правлена вниз, то складывается со статическим весом (весом покоя), а при направлении вверх – вычитается из его величины. Таким образом, вес изменяется на величину силы инерции и называется, в этом случае, *динамическим весом*.

Силы реакции опоры

Тело, расположенное на опоре своим статическим или динамическим весом деформирует ее. Действие веса тела на опору встречает противодействие, которое называют реакцией опоры (или опорной реакцией). *Реакция опоры* – это мера противодействия опоры действию на нее тела, находящегося с ней в контакте. Она равна силе действия на опору, направлена в противоположную сторону и приложена к этому телу.

Когда на опору действует величина статического веса, то величина опорной реакции равна статическому весу. Если на опоре человек выполняет вертикальное ускорение, то к статическому весу добавляется сила инерции и возникает динамическая реакция опоры (рис. 17). Реакция опоры – сила пассивная (реактивная). Она не может сама по себе вызвать положительные ускорения. Однако без нее – если нет опоры, если не от чего оттолкнуться (или не к чему притянуться) – человек не может активно перемещаться.

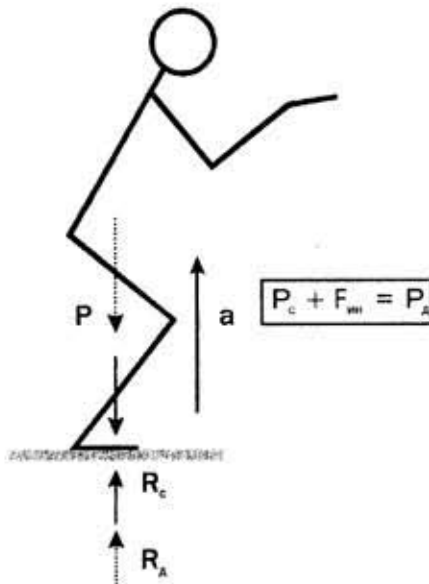


Рис. 17. Действие статического веса тела (P) вызывает статическую реакцию опоры (R), ускорение (a), направленное вертикально вверх, создает силу инерции ($F_{ин}$), направленную вниз. Происходит суммирование величины давления на опору ($P_d = P_c + F_{ин}$). В результате реакция опоры увеличивается (R_d)

Сила трения

Трение это внешнее механическое сопротивление, возникающее при относительном перемещении двух соприкасающихся тел в плоскости их касания. Трение – одно из распространенных явлений природы и встречается почти повсюду. В зависимости от характера перемещения различают:

- трение скольжения;
- трение качения.

Примерами трения скольжения могут служить: трение лыж о снег, коньков о лед, подошвы обуви о пол или покрытие беговой дорожки. Примерами трения качения могут быть: трение при перекачивании колес велосипеда по земле, трение в шариковых и роликовых подшипниках и т. д. В большинстве практических расчетов пользуются эмпирическими законами трения, установленными Кулоном в 1781 г. Он установил следующие (приближенные) законы трения.

1. Сила трения при прочих равных условиях не зависит от размеров трущихся поверхностей. Этот закон справедлив лишь до некоторой величины давления, приходящегося на единицу площади трущихся поверхностей.
2. Величина силы трения прямо пропорциональна нормальному давлению одного тела на другое. Под нормальным давлением понимается давление, направленное по нормали к поверхности скольжения. Когда плоскость горизонтальна (рис. 19), нормальное давление равно весу тела.
3. Величина трения зависит от материала и состояния трущихся поверхностей, от наличия и рода смазки. Так, например, сила трения дерева по дереву больше, чем металла по металлу; сила трения между бронзой и сталью меньше, чем между двумя стальными поверхностями. Чем лучше обработаны трущиеся поверхности, тем меньше трение.
4. Сила трения при движении меньше силы трения при покое. Чтобы вывести тело из состояния покоя, нужно (при прочих равных условиях) преодолеть большую силу трения, чем при движении.

Это можно определить на основе расчета коэффициента трения скольжения (f): $f = R_{тр} / N$, где $R_{тр}$ – сила трения скольжения, N – нормальное давление.

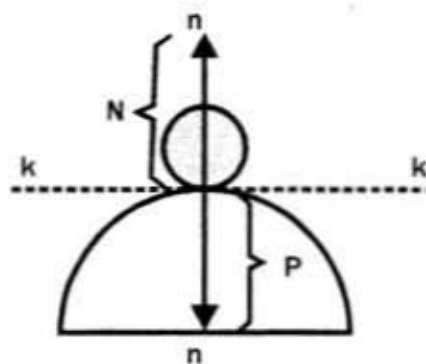


Рис. 18. Тело скользит по горизонтальной поверхности (k...k), давление (N), направленное по нормали (n...n), равно его весу (P)

В таблице 1 приведены средние характеристики скольжения лыж по разному снеговому покрову.

Характеристика трения лыжи о снег		
Характеристика снегового покрова	Оценка скольжения	Коэффициент трения скольжения (f)
Твердый, промерзлый, крепкий весенний наст	Отличное, хорошее	0,02–0,06
Укатанный снег	Удовлетворительное	0,06–0,10
Снег с подлипком, сыпучий глубокий снег, снег с проваливающейся коркой	Удовлетворительное Плохое	0,10–0,90

Итак, *трением скольжения* называется сопротивление, которое возникает при скольжении одного тела по поверхности другого. Примером может служить скольжение коньков по льду. Коэффициент трения стали по льду, зависит от качества льда и полоза конька. Чем чище вода, из которой изготовлен лед, чем меньше в ней примесей, тем меньше коэффициент трения. Неровности и грязь на льду или полозе конька резко повышают его. При скольжении конька по льду непосредственно под полозом вода подтаивает, образуя очень тонкий слой смазки, которая уменьшает трение в 8-10 раз. Чем ниже температура воздуха и тверже лед, тем меньше образуется смазки. В то же время, недостаточно прочный лед под коньками разрушается. Наилучшим скольжение бывает при наибольшей разнице между температурой льда и температурой окружающего воздуха, что возможно на катках с искусственным льдом и на высокогорных катках. На обычных катках скольжение лучшим бывает при температуре воздуха минус 3-5° С.

Основной причиной, вызывающей сопротивление, являются не абсолютно гладкие поверх-

ности соприкасающихся тел. При перемещении одного тела по поверхности другого требуется некоторая сила для преодоления этого сопротивления. Даже если с технической точки зрения поверхности идеально гладкие, все равно необходимо приложить силу для преодоления молекулярного взаимодействия между частицами поверхностных слоев соприкасающихся тел.

Сила трения считается равной произведению нормального давления на коэффициент трения:

$$T = N \cdot k_{тр},$$

где $k_{тр}$ – коэффициент трения, N – величина нормального давления (прижимающая сила).

В рассматриваемом случае сила трения – динамическая. Если одно тело не может скользить по другому, то сила трения удерживает его в неподвижности (рис. 19).

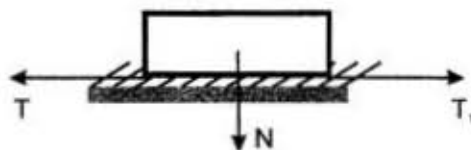


Рис. 19. Сила трения скольжения
T₁ – сдвигающая сила; T – сила трения;
N – сила нормального давления

Такая сила трения называется статической (или силой трения скольжения покоя). Согласно третьему закону Ньютона, статическая сила трения равна сдвигающей силе.

Силы трения, направленные навстречу движению, тормозят его. Они вызывают отрицательное ускорение, совершают отрицательную работу. С другой стороны, силы трения, направленные одинаково с движением, не создают положительного ускорения, не совершают положительной работы, только не позволяют точке контакта движущегося тела «проскальзывать» назад.

Силы действия среды

При выполнении движений человеку приходится преодолевать сопротивление, которое связано с плотностью воздуха и воды. Действие среды на человека может быть статическим (выталкивающая сила) и динамическим (лобовое сопротивление, а также нормальная реакция опоры).

В наземных и водных локомоциях на тело человека действует сила лобового сопротивления (рис. 20).

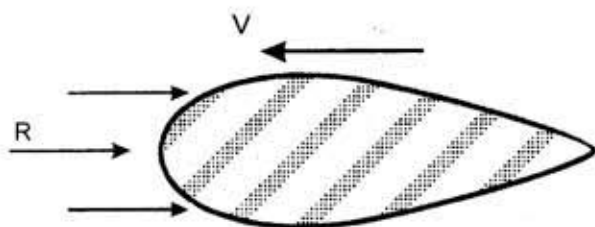


Рис. 20. Сила действия среды. Движение тела со скоростью V приводит к возникновению силы сопротивления R , вектор которой направлен в противоположную сторону вектора скорости

Численно она равна произведению площади поперечного сечения тела, плотности и вязкости среды, а также относительной скорости движения тела:

$$R = S_m C \times \rho V^2,$$

где S_m – площадь наибольшего поперечного сечения тела (мидель), C – коэффициент лобового сопротивления, зависящий от формы тела, ρ – плотность среды (воды или воздуха), V – относительная скорость среды и тела.

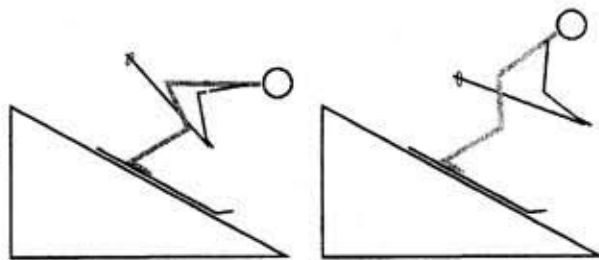


Рис. 21. Спуск на лыжах с горы в разных стойках. В низкой стойке сопротивление среды значительно уменьшается

Для изменения величины лобового сопротивления прибегают, в первую очередь, к изменению площади поперечного сечения тела. Например, у лыжника при спуске с горы в высокой стойке эта площадь почти в 3 раза больше, чем в низкой (рис. 21).

Следовательно, при прочих равных сопротивление воздуха при спуске можно изменить почти в 3 раза за счет применения более рациональной позы (стойки).

Силы внутренние относительно тела человека

При взаимодействии частей биомеханической системы тела возникают силы внутренние относительно этого тела. В частности, они проявляются как силы отталкивания и притягивания внутри тела. В абсолютно твердом теле такие силы взаимно уравновешены, поэтому деформации и напряжения в них не возникают. В теле человека внутренние силы могут действовать статически, при этом возникают только напряжения в деформированных тканях, и динамически, что вызывает движение звеньев и изменение позы.

Выделяют внутренние силы активного действия (мышечная работа) и пассивные механические силы (пассивное взаимодействие). Силы мышечной тяги, приложенные к костям скелета, служат источниками энергии движения, сохраняют необходимые позы, управляют движениями, изменяют взаимодействие тела человека с окружающими физическими объектами (среда, опора, снаряды и другие люди). Управляя своими движениями, человек учится управлять (в известных пределах) и внешними силами, а значит, эффективно управлять своими движениями в конкретных условиях внешнего окружения. В ряде случаев силы мышечных тяг называют усилиями.

Силы пассивного взаимодействия, в отличие от сил мышечной тяги, не вызваны непосредственно физиологической активностью, биологическими процессами, хотя в некоторой степени и зависят от них. По мере совершенствования движений становится возможным лучше использовать мышечные силы. Техническое мастерство проявляется в повышении роли внешних и пассивных внутренних сил как движущих. Это обеспечивает не только экономность (сбережение сил), экономичность (высокий КПД мышечных сил), но и проявление максимума мышечных сил, а также значительную быстроту достижения этого максимума при движении.

Резюме

Механическое движение материальных тел может быть описано законами Ньютона. Они представляют собой результат обобщения вековых наблюдений за движением материальных тел в природе и при эксперименте.

Эти законы устанавливают связи между приложенной к телу силой и возникающим при этом ускорением с учетом действующих масс. Это закон инерции (первый закон), второй закон – основной закон динамики, который указывает на то, что между силой и изменением скорости (ускорением) существует прямая пропорциональность; и закон равенства действия и противодействия (третий закон).

Момент инерции тела при вращательном движении играет ту же роль, что масса тела при поступательном. Так же как масса тела является мерой его инерционности при поступательном движении, так и момент инерции тела относительно данной оси является мерой его инерционности при вращательном движении вокруг этой оси.

На тело человека действуют внешние силы, которые осуществляют либо деформацию, или ускорение биозвеньев и всего тела в целом.

Движение тела, относительно какой-либо системы отсчета – результат взаимодействия внешних и внутренних сил или их моментов.

Вопросы для повторения и закрепления материала главы

1. Основные понятия и законы динамики.
2. Понятие инерции, инерционные характеристики: масса и момент инерции.
3. Сила – определение. Действия силы динамическое и статическое
4. Определение момента силы, импульса силы и кинетического момента.
5. Геометрия масс тела человека и способы ее изучения.
6. Общий центр тяжести и массы тела. Центры масс отдельных биозвеньев
7. Внутренние и внешние силы. Их взаимодействие, как основа движения тела.
8. Комплекс внешних сил, их определение, примеры в движениях человека и спортивных снарядов.
9. Классификация сил по их эффекту: силы рабочие, силы сопротивления, отклоняющие и восстанавливающие силы (и/или их моменты)).
10. Взаимодействие внешних и внутренних сил как причина движения тел.

Глава 5. Энергетика двигательной деятельности

Энергия: понятия и определения

Энергию можно определить как способность совершать работу, а работу (A), в свою очередь, – как произведение силы (F) на расстояние (S). Например, если с помощью какой-либо силы поднимают груз массой 1 кг на высоту 1 м, сила эта равна 1 кг, а совершенная механическая работа – 1 м · кг. Энергия, затрачиваемая на совершение этой работы (то есть полезная энергия, не включающая ту, которая затрачивается на преодоление трения или выделяется в виде тепла), тоже составляет 1 м · кг.

Груз массой 1 кг, поднятый на высоту 1 м, обладает потенциальной энергией 1 м · кг, которая превращается в кинетическую энергию (энергию движения) после того, как груз перестают удерживать и он падает.

В двигательных действиях происходит превращение одних видов энергии в другие (химической в механическую и тепловую) и преобразование механической энергии (кинетической в потенциальную и наоборот). Изучение источников энергии, путей ее перехода, условий индивидуального использования и ее потерь необходимо для совершенствования систем движений.

Подвод энергии в биомеханическую систему совершается в результате: а) превращения химической энергии в механическую напряженной мышцы, б) перехода работы внешних сил в кинетическую энергию биомеханической системы и потенциальную энергию деформированных мышц и перемещаемого тела. Энергия расходуется на: а) производительную работу; б) непроизводительные затраты, связанные с ее превращением и рассеянием энергии; в) преобразование ее при накоплении в растянутой мышце. Механическое движение человека сопровождается изменением механического состояния его тела; это состояние определяется энергией биомеханической системы. Величина и характер расхода энергии при движениях зависят от особенностей движений. Коль скоро происходит расход энергии, необходим и подвод ее. Существует, по меньшей мере, два источника энергии, используемой в движениях. Первый источник — запасы химической энергии. Этот источник находится в мышцах, других органах и крови.

В мышцах происходят химические реакции, и возникает напряжение в сократительных элементах: химическая энергия превращается в механическую – потенциальную энергию упруго деформированных элементов мышц.

Второй источник энергии движений – это

механическая энергия внешнего окружения (внешних тел, среды, партнеров и противников). Она передается телу посредством работы внешних сил: а) кинетическая энергия движущихся объектов (например, бросок, выполненный противником в борьбе) и б) потенциальная энергия положения (например, движение вниз при соскоке с перекладины в поле земного тяготения). В этих случаях спортсмен движется пассивно. Все активные движения совершаются благодаря преобразованию потенциальной энергии напряженных мышц в кинетическую энергию звеньев тела и всего тела в целом. Силы тяги мышц совершают работу. Напомним, что работа силы – процесс изменения энергии (состояния). Всегда, когда изменяется количество или форма энергии, это следствие работы сил. Приобретенная энергия не всегда тотчас же расходуется.

Неизрасходованная энергия накапливается. Химическая энергия «запасается» благодаря питанию и дыханию человека. Она превращается в механическую (потенциальную) энергию напряженных мышц. Накопление энергии в мышцах происходит и другим путем: когда мышцы растягиваются в уступающей работе, тормозя движение звеньев тела. Кинетическая энергия последних преобразуется в потенциальную энергию упруго деформированных мышц. Наконец, накопление энергии может быть в виде потенциальной энергии тела человека, когда он поднимает себя против сил тяжести.

Каковы же затраты механической энергии тела человека? Естественно, что когда человек двигается, он затрачивает кинетическую энергию на передвижение своего тела и движимых им внешних тел (например, метание спортивного снаряда). Работа против внешних сил идет за счет уменьшения механической энергии тела, с увеличением кинетической энергии внешних тел.

Известно, что затраты кинетической энергии бывают производительными (на решение двигательной задачи) и непроизводительными (против вредных сопротивлений, например, сил трения). Возможны затраты кинетической энергии тела, как уже упоминалось, и на превращение ее в потенциальную (например, движение вверх в висе на перекладине после маятникообразного движения вниз). Ранее были названы способы затраты кинетической энергии на накопление потенциальной энергии как в мышцах (рекуперация энергии), так и во всем теле в поле земного тяготения.

При всех изменениях энергии значительная часть ее превращается в тепловую и рассеивает-

ся. Согласно первому закону термодинамики, энергия во Вселенной не создается и не исчезает. Таким образом, если мы сжигаем уголь или дрова в топке паровой машины, то энергия не образуется, а просто превращается из одной формы в другую. В данном примере химическая энергия переходит в тепловую, тепловая в механическую, а механическая идет на совершение работы.

Из затрат механической энергии не более 1/4 идет на механическую работу (КПД составляет 20-25%). Такова несколько упрощенная схема превращения и преобразования энергии, которая точно также осуществляется и при движениях человека.

Совершаемая человеком механическая работа расходуется на увеличение потенциальной и кинетической энергии самого тела человека, спортивных снарядов и других предметов.

Потенциальная энергия (E_n) и кинетическая в поступательном $E_k(\text{пост})$ и вращательном $E_k(\text{вр})$ движениях определяются по формулам:

$$E_n = mgh; E_k(\text{пост}) = 1/2mV^2; E_k(\text{вр}) = 1/2J\omega^2,$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, h – высота ОЦТ тела над поверхностью земли, V – линейная скорость тела, ω – угловая скорость, m – масса тела, J – момент инерции тела.

Реальные спортивные или бытовые движения могут включать и поступательную и вращательную форму перемещения тела и/или его частей. При этом может происходить сложение механической энергии разных видов. Полная энергия тела согласно теореме Кенига [В.Л. Уткин, 1989] равна сумме его потенциальной и кинетической энергии в поступательном и вращательном движениях и может быть выражена уравнением вида:

$$E_{\text{полн}} = mgh + mV^2/2 + J\omega^2/2$$

При осуществлении движений, проявлениях мощности и выполнении работы в механическую энергию превращается далеко не вся энергия, большая ее часть подвергается диссипации, например, превращается в тепло. При этом степень тепловых потерь может быть разной. Для оценки эффективности превращения механической энергии рассчитывают коэффициент полезного действия (по аналогии с техническими устройствами), для движений человека – это коэффициент механической энергии (КМЭ):

$$\text{КМЭ} = A/E \cdot 100\%,$$

где E – количество метаболической энергии, Дж; A – произведенная работа.

В спортивной практике оценивать эффективность расхода энергии можно косвенным спосо-

бом, без прямого определения энергозатрат. В качестве такого показателя может служить величина пульсовой стоимости (ПС) метра скорости или единицы темпа движения в циклических локомоциях (бег, ходьба, плавание, гребля, коньки, лыжи и др.). Ее вычисляют по формуле:

$$\text{ПС} = \text{ЧСС} (\text{мин}^{-1})/V (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}),$$

где ЧСС – частота сердечных сокращений за минуту, V – скорость движения.

В настоящее время возможности контроля пульсовой стоимости работы значительно увеличились благодаря применению портативных, удобных и многофункциональных пульсометров типа Polar (Финляндия).

Лабораторные исследования и расчеты показали, что коэффициент полезного действия при работе мышц как «химических машин» не превышает 22% [Р. Александер, 1970]. Обычно такие определения производят с помощью велоэргометра. С помощью этого прибора также можно определить максимальную мощность работы. Было показано, что она достигает 40 Вт на 1 кг мышечной ткани. На таком уровне она может оставаться лишь короткое время, так как в таком интенсивном режиме сокращения мышцы не могут получить кислород с необходимой скоростью.

Повысить коэффициент полезного действия мышечной системы в реальных движениях можно при использовании энергии упругой деформации. При этом происходит накопление ее в одних фазах движения (например, фаза амортизации в беге) и использование в других, например, в фазе отталкивания.

Эффективно происходит накопление энергии в возвратных движениях. Они включают фазу прямого движения (с торможением) – подготовительную и фазу обратного движения (с разгоном) – рабочую, которые разделены критической точкой на траектории. Возвратные движения характеризуются сменой направления движения на противоположное (туда – обратно). Обычно и прямое, и обратное движения состоят из двух фаз: а) прямое – разгон и торможение, б) возвратное – вновь разгон и торможение. Между ними имеется критическая точка – положение, из которого происходит смена направления скорости. Это положение может быть мгновенным (промежуточным в движении); возможна также остановка в этом положении.

Нередко возможно и рационально делать возвратное движение, используя криволинейную траекторию. Замах тогда переходит в удар (например, в теннисе) без остановки в движении по кривой, с постепенным переключением активнос-

ти с одних мышц на другие. Энергетически наиболее целесообразно тормозить звено упругими силами, чтобы лучше использовать «упругую отдачу» мышц. Необходимо только, чтобы растягивание тормозящих мышц делали внешние силы (например, сила тяжести и сила инерции тела в тройном прыжке). Тогда будут использованы «даровые» силы и экономиться энергия мышечного сокращения.

При возвратном движении максимальное напряжение движущих мышц включает и активные силы мышечного сокращения, и накопленные при подготовке упругие силы. В критической точке положение звеньев (исходная поза) определяет возможные направления и размах движений, силу тяги групп мышц, тормозящих прямое и ускоряющих обратное движения, а также их антагонистов. Последние не должны ни тянуть звено в конце прямого движения, ни тормозить его в начале обратного. Иначе говоря, в рациональных возвратных движениях они возможно полно расслаблены.

Итак, энергетически целесообразно тормозить звено не включая сократительные элементы; растягивать мышцы только внешними силами; включать сократительные элементы в критической точке; поддерживать активное сокращение только в фазе разгона обратного движения.

Рациональный режим колебательных движений включает упругую отдачу мышц в сочетании с сохранением и резонансным накоплением энергии в мышцах путем совершенствования управления энергетикой. В так называемых циклических движениях, где многократно повторяется одинаковый ряд движений, часто используется колебательный режим. Для него характерна многократная смена повторяющихся возвратных движений (например, движения ног при беге). Подвод энергии совершают сократительные элементы мышцы в критических точках траектории. Тогда каждый новый цикл происходит на более высоком уровне энергии; увеличение кинетической энергии означает повышение скорости. На цикл затрачивается меньше времени, растет темп. Таким образом, например, в беге становится больше скорость продвижения по дорожке. В разбеге благодаря резонансному накоплению энергии повышается мощность. Накопление энергии в мышце обеспечивается параллельными упругими компонентами. Они обладают высоко нелинейной упругостью.

Механизм упругой отдачи мышцы в возвратных движениях дополняется в колебательном режиме резонансным накоплением энергии. Ав-

томатическое включение сократительных элементов в критической точке (автоколебания) повышает эффективность резонанса.

Итак, для лучшего использования мышечной энергии в движениях целесообразно:

- 1) растянуть мышцы в подготовительной фазе;
- 2) при растягивании мышечных волокон передать им больше кинетической энергии (разогнать звено до большой скорости и резко остановить);
- 3) в обратном движении в критической точке своевременно совершить активное сокращение мышцы по принципу автоколебаний, наиболее акцентированное с самого начала («взрывная» сила).

Совершенствование движений, характерных для спортивной техники в одиночных возвратных движениях и в циклических колебательных движениях, имеет много общего. В основе его лежит перестройка биоэнергетики; изменение вклада энергии из разных источников, изменение организации управления энергетикой. Это одно из самых характерных отличий совершенствования биосистем от совершенствования технических механизмов. Как видно, мышца в этом отношении имеет много функций, она выступает как:

1. генератор механической энергии, получаемой из химического источника;
2. трансформатор механической энергии (из потенциальной в кинетическую и обратно);
3. аккумулятор упругой энергии в мышце (в резонансном режиме);
4. движитель, передающий механические усилия звеньям тела;
5. фиксатор звеньев в суставах (при опорных тягах);
6. регулятор величины и направления скорости (в биодинамически полно связном механизме);
7. демпфер, поглощающий и рассеивающий энергию (при погашающей амортизации);
8. упругий амортизатор (создающий обратное движение в возвратном и колебательном режиме).

Следует упомянуть, что мышца еще и рецептор – она сигнализирует в мозг о положении и перемещении звена. Без этого невозможно полноценное управление позами и движениями тела и его частей. Превращая химическую и механическую энергию в тепловую (и рассеивая ее), мышца еще участвует и в терморегуляции тела.

Резюме

Для совершения работы необходимо затратить энергию. Работа и энергия в механике измеряются одинаковыми единицами – джоулями.

В движениях человека используется как энергия, генерированная его мышцами, так и полученная в результате действия внешних тел.

При анализе эффективности движений рассматривают источник энергии и коэффициент ее использования в конкретной двигательной деятельности.

Важным источником энергии служит энергия упругой деформации в мышечной системе. Это может увеличивать КПД двигательного действия до 50%. Правильно построенная система движений использует рекуперацию энергии.

Вопросы для повторения и закрепления материала главы

1. Понятие энергии и работы.
2. Способы получения энергии в движениях человека.
3. Мышцы как генератор механической энергии.
4. Преобразование механической энергии в движениях человека.
5. Способы повышения энергетической экономичности движений.
6. Рекуперация энергии упругой деформации.
7. Накопление энергии в фазах возвратных движений.
8. Мышца как рекуператор и резонатор механической энергии.
9. Физиологические свойства мышц и их энергетика.

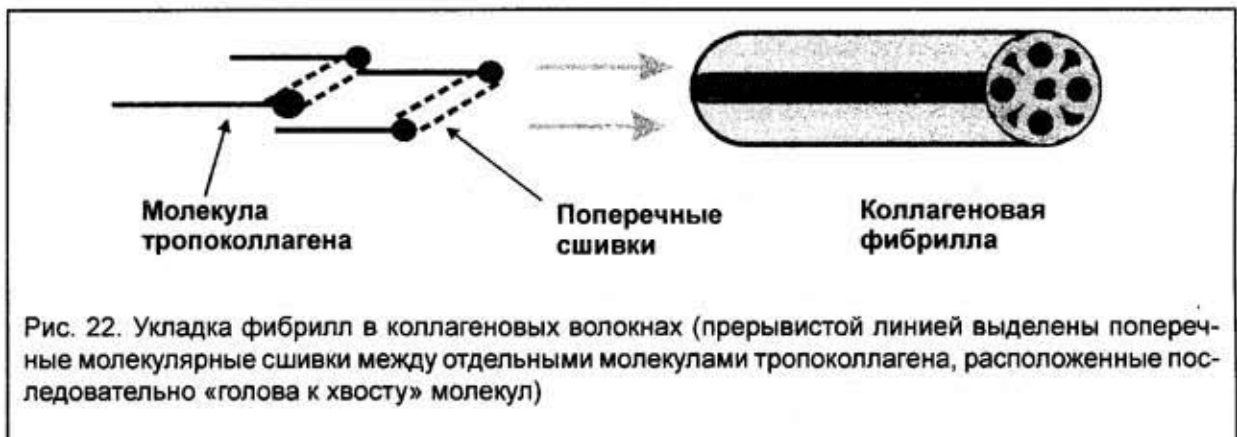
Глава 6. Биомеханика двигательного аппарата человека

Костная система

Двигательный аппарат человека представляет собой самодвижущийся механизм, состоящий более чем из 600 мышц и 200 костей. Для того чтобы кость могла выполнять свои функции, она должна быть прочной. Прочность кости зависит от ее химического состава. Около двух третей массы кости или половину ее объема составляет неорганический материал – минеральное вещество кости. Оно содержит кальций, фосфор и гидроксильные ионы в соотношении довольно точно соответствующем формуле гидроксиапатита $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$, а также небольшое количество других ионов. Это вещество представлено в форме микроскопических кристаллов, нередко достигающих $2 \cdot 10^{-9}$ м в длину. В осталь-

(рис. 22). Пустоты в этой структуре при необходимости могут служить местом первоначального отложения кристаллов гидроксиапатита, играющего важную роль в минерализации кости. Длинные оси кристаллов идут параллельно осям коллагеновых фибрилл.

При испытании было установлено, что кость обладает высокой прочностью, различной при деформации растяжения, сжатия, изгиба и кручения. Модуль Юнга у костей млекопитающих составляет 10^{11} дин/см². При этом прочность на сжатие – около $1,8 \cdot 10^9$ дин/см². В повседневной жизни, однако, напряжения в кости редко превышают 50 мПа. Независимо от массы тела животного при максимальной нагрузке относительные деформации трубчатых костей не превышают 0,2-0,3%.



ном кость состоит из органического материала, представленного, главным образом, белком коллагеном. Кажется удивительным, что белки составляют основу таких неподатливых, нерастворимых в воде и прочных материалов, как рога и копыта, шерсть, кожа, кости и сухожилия. К таким белкам предъявляются различные биологические требования. Например, волос – это всего лишь длинное достаточно прочное и нерастворимое волокно. Его основу составляет структурный белок – α -кератин. Сухожилия и сама кость должны быть прочнее стали и лишены эластичности. Эти свойства обеспечивает другой структурный белок – коллаген. Он образуется в организме вне клеток из секретируемого ими белка – проколлагена (тропоколлаген), который превращается в собственно коллаген в результате воздействия соответствующих ферментов. Молекулы тропоколлагена содержат около 1000 аминокислотных остатков. Они собираются в коллагеновые фибриллы, стыкуясь «голова к хвосту»

Например, при галопе у лошади большеберцовая кость деформируется на 0,32% (запас прочности, при этом, составляет 2,1%). При обычной ходьбе человека, в начале опорного периода, возникает изгибающий момент на голень величиной около 50-60 Н·м. В начале опорной фазы ударная волна проходит через кость, причем линейное ускорение достигает $20-80$ м/с² длительностью 15-25 мс. При скорости ходьбы 1,0 м/с нагрузка только в тазобедренном суставе может достигать 6 кН, что на порядок выше веса тела. В спортивной практике такие ускорения намного выше. Так во время бега отрицательное ускорение голени достигает 500 м/с², а в конечной фазе удара при выполнении приемов карате – даже 4000 м/с². В спринтерском беге сила на поверхности голеностопного сустава может достигать 9000 Н. Это значит, что ахиллово сухожилие создает противодействующий момент в сагиттальной плоскости до 300 Н·м и тягу до 6000 Н. Напряжение растяжения достигает в сухожилии 60

мПа – это около 60% предельно допустимой нагрузки на него. Во время прыжков в длину напряжение в сухожилии может достигать 73-75%, что еще ближе к предельно допустимым значениям.

Повышение нагрузок на кости или сухожилия приводит к их повреждению, что часто сопровождается занятиями спортом.

Для соединения отдельных элементов использовано несколько сотен сухожилий. Полагают, что по сложности, двигательная деятельность человека сравнима с работой человеческого мозга. Как все органы и системы тела человека состоят из отдельных элементов, так и двигательный аппарат построен из отдельных биозвеньев (рис.23). Биозвеном называется часть тела, расположенная между двумя соседними суставами

или между суставом и дистальным концом. Например, биозвеньями тела являются: предплечье, плечо, голова, туловище и т. п.).



Рис. 23. Биозвенья тела человека как часть его двигательного аппарата, заключенная между двумя суставами или свободно оканчивающаяся (кисть, голова, стопа)

Биомеханика изучает в теле человека, в его опорно-двигательном аппарате преимущественно те особенности строения и функций, которые имеют значение для совершенствования движений. Для этого рассматривают упрощенную модель тела человека – биомеханическую систему, не принимая во внимание детали анатомического строения и физиологические механизмы двигательного аппарата. Такой подход дает возможность рассматривать двигательную систему как существенный комплекс для выполнения двигательной функции, но не включающий в себя множество частных деталей.

Следовательно, биомеханическая система – это упрощенная копия, модель тела человека, на которой можно изучать основные закономерности движений. Она состоит из биомеханических цепей. Множество частей тела, соединенных подвижно, образует биокинематические цепи. К звеньям этих цепей приложены силы, которые вызывают деформацию звеньев тела и изменение их ускорения.

Твердое тело, подвижно соединенное с другими телами, в кинематике называют *звеном*. Если оно соединено с другим телом, положение которого считается фиксированным, то оно имеет шесть степеней свободы. Так, например, блоковидный сустав допускает лишь вращательное движение и

совершенно исключает поступательное. Два звена, соединенные шарниром, обладают только одной степенью свободы движения относительно друг друга. Существуют еще два простых типа сочленений, допускающих лишь одну степень свободы относительного движения: скользящие сочленения, которые допускают скольжение вдоль одной оси, и винтовые сочленения, как, например, соединение между болтом и гайкой. Винтовое сочленение допускает движение вдоль оси и вращение вокруг нее, но эти движения строго пропорциональны друг другу, и поэтому для того, чтобы описать изменение положения, достаточно одной величины, и соответственно имеется лишь одна степень свободы. Звено, соединенное с другим неподвижным звеном при помощи шаровидного сустава может вращаться вокруг любой оси, проходящей через центр шара, и обладает тремя степенями свободы, так как любое его вращение можно описать, разложив на три поворота вокруг трех осей.

Биокинематические цепи

В технических механизмах, и построенных из них машинах, возможности движений их деталей обычно полностью зависят от способов их соединений. В живых механизмах способы соединения частей тела в биокинематические цепи не полностью определяют возможности движений, например, направление и размах. Участие мышц в управлении движениями делает соединения звеньев способными на множество вариантов движений. Мышцы определяют движения костных рычагов, передающих движение и усилия, и маятников, сохраняющих начавшееся движение.

У человека все подвижные сочленения представляют собой истинные суставы: сочленовные поверхности костей покрыты слоем хряща и заключены в полость, наполненную синовиальной жидкостью. Суставной хрящ напоминает губку с очень тонкими порами, и он пропитан синовиальной жидкостью, которую можно из него выжать. Было высказано предположение о том, что такого рода губчатая структура делает возможным систему смазки, не известную в технике. Ее назвали «выжимающей смазкой» (*weeping lubrication*). Эффект пограничной смазки поверхностей хряща создает гиалуроновая кислота, входящая в состав синовиальной жидкости.

Теория выжимающейся смазки в суставах проста и подкрепляется, казалось бы, убедительными данными, однако она не получила всеобщего признания. Леопольд Динтенфасс подчеркивал сложность механических свойств как синовиальной жидкости, так и суставного хряща и высказывал предположение о том, что действие смазки в суставах можно объяснить на основе новейших разработок в области подвижных соединений в машинах и механизмах.

Соединения звеньев (Биокинематические пары и цепи)

Элементарными частями двигательной системы являются звенья тела, как части двигательного аппарата, помещенные между двумя суставами. Соединенные два соседних звена тела образуют пару, а пары, в свою очередь, создают биомеханические цепи. В механике *кинематической парой* называют подвижное соединение двух звеньев, находящихся в соприкосновении (рис. 24).

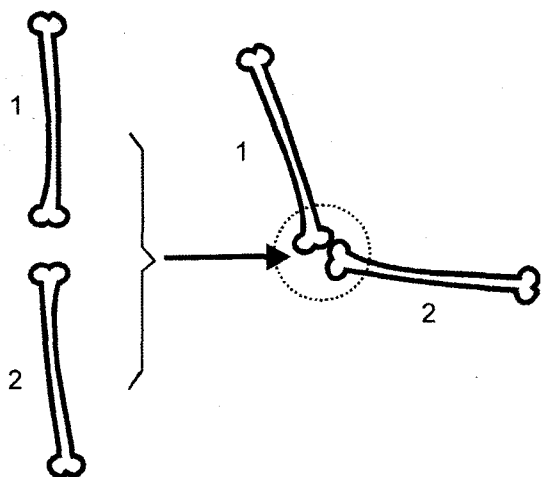


Рис. 24. Объединение двух звеньев (1, 2) в пару

В свою очередь, биокинематическая пара – это подвижное (кинематическое) соединение двух костных звеньев, в котором возможности движений определяются его строением и управляющим воздействием мышц. Одни возможности движений не ограничены (их характеризуют степени свободы движения), другие (полностью ограничены, они определяются степенями связи). Различают связи:

а) геометрические (постоянные препятствия перемещению в каком-либо направлении, например, костное ограничение в суставе);

б) кинематические (ограничение скорости, например, активностью мышц-антагонистов).

В биокинематических парах имеются постоянные связи, ограничивающие степени свободы движения. Почти все биокинематические пары в основном вращательные (шарнирные); немногие допускают чисто поступательное скольжение звеньев относительно друг друга и лишь одна пара (голеностопный сустав) – винтовое движение.

Кинематическая цепь – это система звеньев, соединенных таким способом, что если одно из них закрепить, а какое-то другое привести в движение, то все остальные должны двигаться предписанным образом.

Что касается биокинематической цепи, то это последовательное либо незамкнутое (разветвленное), либо замкнутое соединение ряда био-

кинематических пар (рис. 26). Любые две части кинематической цепи имеют одну степень свободы относительно движения.

Кинематические пары и цепи – понятия, заимствованные из теории механизмов и машин. В живых организмах их правильно называть биокинематическими. Важно отметить, что механизм – это соединение тел, преобразующих и передающих одно другому определенные движения. Тогда как машина – это комплекс механизмов для заданного преобразования одной формы энергии в другую и в работу.

Степени свободы и связи движений

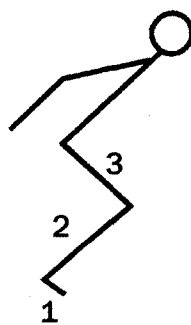


Рис. 25. Звенья тела, как последовательно объединение отдельных биозвеньев (1 – стопа; 2 – голень; 3 – бедро – элементы биоцепи ноги)

Если у физического тела нет никаких ограничений (связей), то оно может двигаться в пространстве во всех трех измерениях, то есть относительно трех взаимно перпендикулярных осей (поступательно), а также вокруг них (вращательно). Следовательно, у такого тела шесть степеней свободы движения. Каждая связь уменьшает число степеней свободы. Зафиксировав одну точку свободного тела, сделав его звеном пары, сразу лишают его трех степеней свободы – возможных линейных перемещений вдоль трех основных осей координат. Примером может служить шаровидный сустав – тазобедренный, в котором три степени свободы из шести (возможно вращение относительно трех осей) (рис.). Закрепление двух точек звена говорит о наличии оси, проходящей через эти точки. В таком случае остается одна степень свободы. Пример подобного ограничения – одноосный сустав, например межфаланговый. Закрепление третьей точки, не лежащей на этой оси, полностью лишает звено свободы движений. Такое соединение к суставам не относится.

В анатомии выделяют также двусосные суставы. Они имеют вторую степень свободы вследствие неконгруэнтности (неполного соответствия по форме) суставных поверхностей (суставы лучезапястный и пястно-фаланговый 1-го пальца). Почти во всех суставах (кроме межфаланговых, лучелоктевых и атлантоосевого) степеней свободы больше, чем одна. Поэтому устройство пассивного аппарата в них обуславливает неопределенность

движений, множество возможностей движений.

Управляющие воздействия мышц вызывают дополнительные связи и оставляют для движения только одну степень свободы («полносвязный» механизм). Так обеспечивается одна-единственная возможность движений – именно та, которая требуется. Каждая биомеханическая пара многоосного сустава включает в себе возможности многих механизмов (А.А. Ухтомский). Из множества возможностей, при помощи управляющих воздействий мышц, выделяют заданное управляемое движение. Биокинематические соединения богаче возможностями, чем кинематические соединения в технических механизмах, но управление ими сложнее.

Следовательно, множество степеней свободы кинематической пары в многоосных суставах требуется для выполнения каждого определенного движения:

- выбора необходимой траектории,
- управления движением по траектории (направлением и величиной скорости),
- регуляции движения, понимаемой как борьба с помехами, сбивающими с траектории.

Звенья тела как рычаги

Рычагом называется твердое тело, шарнирно закрепленное на некоторой оси. В технике рычаг – это чаще всего брус правильной формы. В биомеханике и анатомии тело, образующее рычаг, может иметь довольно сложную форму (рис. 26).

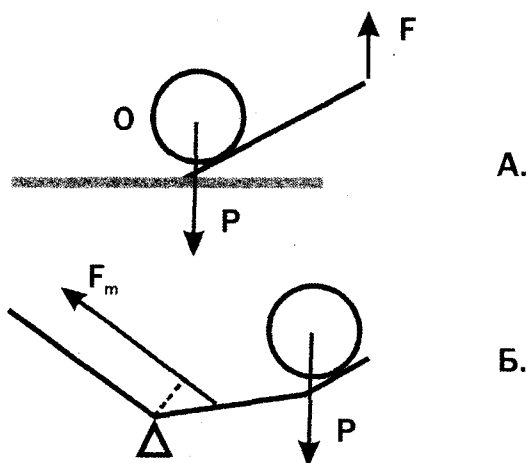


Рис. 26. Рычаги: А – простое механическое устройство; Б – биозвенья тела человека как рычаги, F_m – сила мышечной тяги, P – вес груза. Прерывистой линией показано плечо силы тяги мышцы

Кости как твердые (негибкие) звенья, соединяясь подвижно, образуют основу биокинематических цепей. Приложенные силы действуют на звенья как на рычаги или маятники. Во многих случаях звенья сохраняют движение под дей-

ствием приложенных сил.

Костные рычаги – звенья тела, подвижно соединенные в суставах под действием приложенных сил, – могут либо сохранять свое положение, либо изменять его. Они служат для передачи движения и работы на расстояние. Все силы, приложенные к звену как рычагу, можно объединить в две группы: а) силы или их составляющие, лежащие в плоскости оси рычага (они не могут повлиять на движение вокруг этой оси) и б) силы или их составляющие, лежащие в плоскости, перпендикулярной к оси рычага (они могут влиять на движение вокруг оси в двух противоположных направлениях).

Рассматривая действие сил на рычаг, учитывают только силы, направленные по ходу движения (движущие) и против него (тормозящие). Когда группы сил приложены по обе стороны от оси (точки опоры) рычага, его называют двуплечим или рычагом первого рода (рис. 27 А), а когда по одну сторону – одноплечим, или рычагом второго рода (рис. 27 Б).

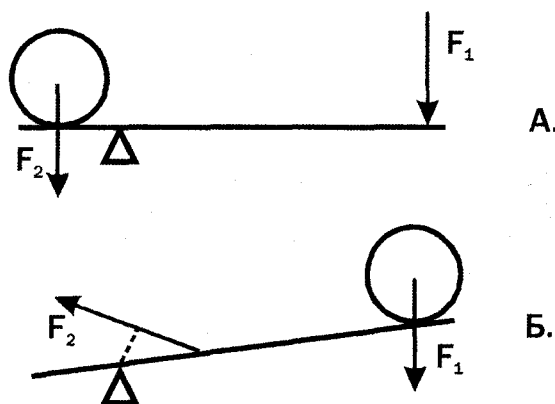


Рис. 27. А – двуплечий рычаг (или рычаг первого рода); Б – одноплечий рычаг (второго рода)

Для разных мышц, прикрепленных в разных местах костного звена, рычаг может быть разного рода. Так, относительно своих сгибателей предплечье (при работе против веса груза) представляет собой одноплечий рычаг; относительно же мышц-разгибателей (при удержании груза над головой) – двуплечий рычаг.

При преодолевающих движениях сила сокращающихся мышц (равнодействующая тяга) представляется как движущая сила. Тогда как при уступающих движениях сила растягиваемых мышц (их равнодействующая тяга) – тормозящая.

Силы сопротивления направлены противоположно действию мышц. Каждый рычаг имеет следующие элементы (рис. 27): а) точку опоры, б) точки приложения сил, в) плечи рычага (расстояния от точки опоры до точек приложения сил) и г) плечи сил (d – расстояния от точки опоры до линий действия сил – опущенные на них перпен-

дикулярны. Мерой действия силы на рычаг служит ее момент относительно точки опоры (произведение силы на ее плечо, $M = F \cdot d$).

Условия равновесия и ускорения костных рычагов

Сохранение положения и движения звена как рычага зависит от соотношения противоположно действующих моментов сил. Когда противоположные, относительно оси сустава, моменты сил равны, звено либо сохраняет свое положение, либо продолжает движение с прежней скоростью (моменты сил уравновешены). Если же один из моментов сил больше другого, звено получает ускорение в направлении его действия.

Момент движущих сил, преобладая над моментом тормозящих сил, придает звену положительное ускорение (в сторону движения). Момент тормозящих сил, если он преобладает, придает звену отрицательное ускорение, вызывает торможение звена. В реальных движениях моменты этих двух групп сил редко бывают равны, и поэтому движения обычно либо ускоренные (положительное ускорение, разгон звена), либо замедленные (отрицательное ускорение, торможение звена).

Для сохранения положения звена в суставе необходимо равенство моментов сил. При всех движениях угол между направлением равнодействующей группы сил и звеном изменяется. Плечо рычага – расстояние от точки опоры рычага до места приложения силы – остается неизменным. Однако, плечо силы (d) изменяется. При этом обычно изменяется и сама сила мышечной тяги. Следовательно, момент силы тяги мышц не остается постоянным. Все это создает большие трудности для управления движениями, но вместе с тем обуславливает и широкие возможнос-

ти изменения движения. Когда сила приложена к рычагу под углом, отличающимся от прямого, ее можно разложить на тангенциальную составляющую (касательную к траектории точек рычага) (см. рис. 27, А и Б) и нормальную (перпендикулярную к направлению движения). Тангенциальная составляющая влияет на скорость движения рычага, поэтому ее называют вращающей (или явной). Нормальная составляющая (направленная вдоль рычага), с точки зрения механики, никакого действия на звено прямо не производит. Однако она прижимает суставные поверхности костей друг к другу и этим укрепляет сустав; отсюда ее название – укрепляющая (или скрытая).

По сути дела, звенья действуют в биомеханической цепи чаще всего как составные рычаги, в которых очень сложные условия передачи движения и работы. В простом рычаге работа силы, приложенной в одной его точке, передается на другие точки полностью. Если плечи сил неравны, то прилагаемая сила передается либо с потерей (но с выигрышем в пути, следовательно, и в скорости), либо, наоборот, с выигрышем в силе, но с потерей в скорости. В одноплечих рычагах направление передаваемой силы изменяется, а в двухплечих – не изменяется.

Сила тяги мышц обычно приложена на более коротком плече рычага, и поэтому плечо ее силы относительно невелико. Это связано с тем, что в большей части случаев мышцы прикрепляются вблизи суставов. Когда мышца расположена вдоль звена и прикрепляется вдалеке от сустава, угол тяги ее очень мал и поэтому плечо силы также невелико (рис. 28). В связи с этим силы тяги мышц, действующие на костные рычаги, почти всегда имеют проигрыши в силе, но дают выигрыш в скорости.

Различают две основные причины проигрыша в силе:

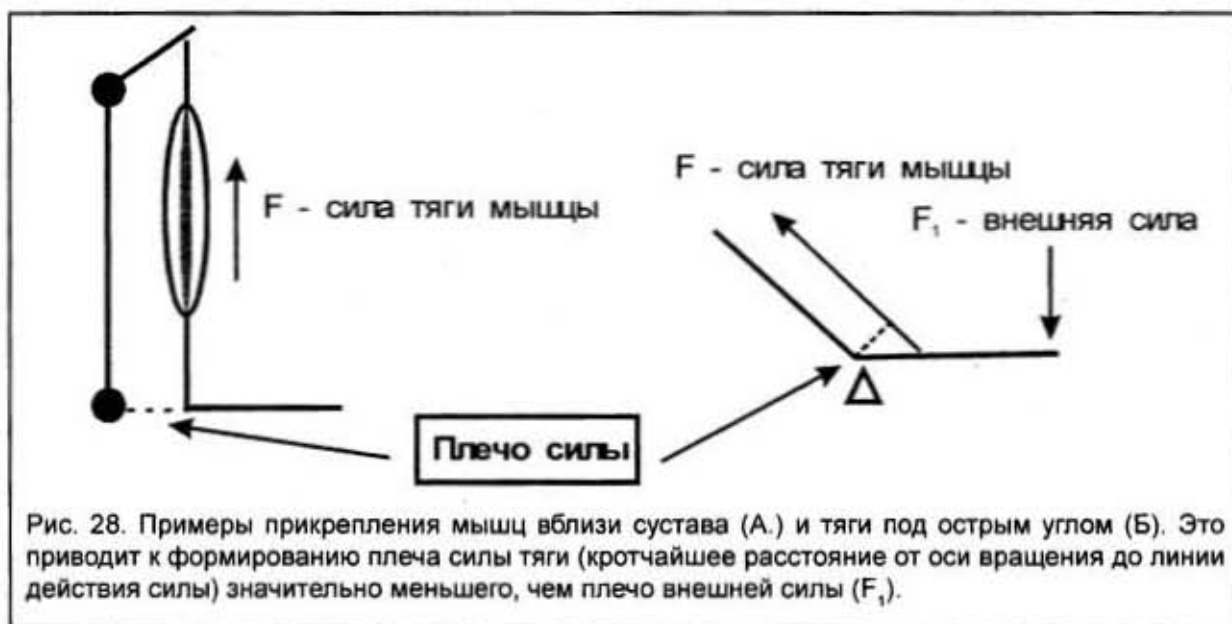


Рис. 28. Примеры прикрепления мышц вблизи сустава (А.) и тяги под острым углом (Б). Это приводит к формированию плеча силы тяги (кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы) значительно меньшего, чем плечо внешней силы (F_1).

1. прикрепление мышцы вблизи сустава;
2. тяга мышцы вдоль кости под острым или тупым углом.

Имеется и третья причина некоторых потерь в силе мышц. При больших нагрузках напрягаются все мышцы, окружающие сустав. Мышцы-антагонисты, создавая моменты сил, которые направлены противоположно друг другу, полезной работы не производят, а энергию на напряжение затрачивают. Однако в этом есть определенный смысл, хотя и происходят потери энергии: сустав во время больших нагрузок укрепляется благодаря напряжению мышц, которые его окружают.

Биокинематические маятники

Иногда полезно рассматривать движения тела или его звеньев как маятников (например, движение ноги при ходьбе или беге). Звено тела, продолжающее после разгона движение по инерции, имеет сходство с физическим маятником. Маятник в поле силы тяжести, выведенный из равновесия, сначала под действием момента силы тяжести качается вниз, а далее, затрачивая приобретенную кинетическую энергию, поднимается по инерции вверх.

Период качаний маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{J/mgr},$$

где J – момент инерции маятника относительно оси, проходящей через точку подвеса, m – его масса, g – ускорение свободно падающего тела, r – радиус центра массы звена (ЦМ), то есть расстояние между точкой подвеса и ЦМ.

Период качаний определяет собственную частоту движения маятника, и, как видно из формулы, как будто не зависит от их амплитуды. Однако это не совсем так; данная формула действительна только для малых колебаний (не более $5-7^\circ$, когда $\sin \alpha$ примерно равен углу отклонения α). При более значительных отклонениях (например, качаниях ног в ходьбе, беге) частота качаний зависит от их амплитуды. Более того, длина «маятника» при сгибании и разгибании ноги изменяется, поэтому нога как маятник постоянной собственной частоты не имеет. Ускорение звена как маятника зависит от приложенного момента силы ($M_0 = F_0 r$) и момента инерции маятника ($J = \tau r^2$) и может быть записано как

$$\varepsilon = M_0/J,$$

где ε – угловое ускорение.

Из приведенных уравнений видно, чтобы увеличить ускорение, надо увеличить либо силу, либо плечо, либо и то и другое или же уменьшить радиус инерции.

Составные маятники (несколько подвешенных друг к другу маятников) ведут себя намного сложнее. Именно поэтому в каждом шаге моменты мышечных сил нужно приспосабливать к переменным механическим условиям, чтобы обеспечивать относительное постоянство шагов.

Моменты инерции фигурируют при рассмотрении обычного бега и галопа животных. Значительная часть энергии, используемой при беге по ровной местности, расходуется на то, чтобы придать конечностям ускорение, направленное поочередно то вперед, то назад. Чем больше моменты инерции конечностей, тем больше требуется энергии. Моменты инерции будут меньше, если мускулатура расположена главным образом в области бедра и плеча, а не по всей длине ноги, так как они возрастают при удалении массы от оси вращения. У млекопитающих, способных к быстрому бегу, много мышечной ткани в проксимальных частях конечностей и относительно мало – в их дистальных отделах.

Биомеханика мышц

У животных есть три главных механизма генерации движения – 1) амебоидное движение, 2) биение ресничек и жгутиков, 3) мышечное сокращение. Со времен античности сокращение мышц – наиболее наглядный и хорошо видимый невооруженным глазом признак жизни животного организма – особенно занимало исследователей. Гален во II веке полагал, что «животные духи», проникая по нервам в мышцу, раздувают ее, что приводит к увеличению ее диаметра, и вместе с тем ее укорачивают. На основе фактов, полученных с помощью электронной микроскопии, биохимических и биофизических методов, удалось понять, как организован сократительный аппарат мышц и каким образом он обеспечивает их укорочение. В мышце основная масса клеточного вещества специализирована для выполнения сократительной функции. Два основных (мажорных) белка, выполняющих эту функцию, – актин и миозин – составляют около 80% массы сократительного аппарата мышечной клетки. Структурная организация этих белков в мышце строго упорядочена, что дает ключ к пониманию механизма их взаимодействия при мышечном сокращении.

Мышцы предназначены для выполнения самых разнообразных сократительных функций. От скелетных мышц может потребоваться быстрый рывок или длительное сокращение. Длительная непрекращающаяся активность – качество сердечной мышцы, которая способна функционировать без остановки целое столетие и даже дольше. Летательные мышцы комара могут сокращаться до 1000 раз в секунду. Запирательная мышца моллюска поднимает груз весом 10 кг.

Общим свойством всех мышц можно, по-видимому, считать взаимодействие между актиновыми и миозиновыми нитями с использованием энергии, освобождающейся при гидролизе АТФ. Нити, однако, могут различаться и по структурной организации, и по белковому составу. Мышцы, кроме того, способны использовать различные метаболические реакции для синтеза АТФ; они могут также различаться по нервной регуляции и по ответным реакциям на нервные импульсы и химические медиаторы. Мышцы обычно классифицируют по одной из таких характеристик, и это нередко приводит к нечетким разграничениям и путанице в терминологии.

Поперечнополосатые мышцы позвоночных получили свое название из-за их поперечной исчерченности, видимой в световой микроскоп. Эта исчерченность обусловлена упорядоченностью упаковки нитей (протофибрилл) в поперечнополосатых мышцах, что отличает их от гладких мышц позвоночных, у которых такая упорядоченность структуры отсутствует, и мышечные клетки кажутся почти бесструктурными при разрешающей силе светового микроскопа. К классу гладких мышц позвоночных относятся весьма несходные между собой мышцы; их функция не подчиняется сознательному контролю; в основном это произвольные сокращающиеся мышцы внутренних органов.

Поперечнополосатые мышцы принято подразделять на скелетные и сердечные; помимо различий в их анатомическом строении, они отличаются также и по механизму возбуждения. Скелетные мышцы подчиняются сознательному контролю, то есть сокращаются произвольно, тогда как для сердечной мышцы характерны ритмичные циклы автоматического сокращения – расслабления. Некоторые волокна скелетной мышцы могут отвечать на одиночный нервный импульс по принципу «все или ничего», тогда как другие, имеющие множественную иннервацию способны развивать градуальное тоническое сокращение. Однако и мышца, состоящая из волокон, сокращающихся по принципу «все или ничего» (фазные волокна), может давать также градуальную реакцию за счет изменения числа реагирующих на возбуждение волокон. По скорости развития напряжения во времени фазные волокна подразделяются на «быстрые» и «медленные».

О функции мышцы можно судить даже по ее цвету. Красные мышцы содержат много цитохромов и миоглобина, то есть белков, участвующих в окислительном метаболизме и обеспечивающих длительное поддержание мышечной активности. В белых мышцах быстрый синтез АТФ осуществляется за счет гликолиза, и в них относительно легко накапливается кислородный долг. Белые мышцы состоят в основном из быстрых фазных волокон, активность которых проявляется в виде коротких одиночных сокращений (отдельных «подергива-

ний»). Некоторые мышцы содержат фазные волокна двух типов — быстрые и медленные.

Физиологические состояния мышц

Расслабленные скелетные мышцы легко растяжимы. Актиновые и миозиновые нити в расслабленной мышце не взаимодействуют друг с другом, и вся эластичность мышцы обусловлена мембранами волокон и связанной с мембранами соединительной тканью. Реакция мышцы на стимуляцию зависит от наложенных на нее внешних ограничений. Если длина мышцы фиксирована, мышца при стимуляции будет развивать напряжение. Этот процесс называют изометрическим сокращением, хотя фактически мышца – в обычном смысле этого слова – не сокращается, то есть не укорачивается. Если мышца удерживает груз, который меньше развиваемого ею изометрического напряжения, мышца укоротится. Стационарная скорость такого изотонического сокращения достигает максимального значения, когда внешняя нагрузка стремится к нулю. Внешняя сила, превышающая максимальное изометрическое напряжение (P_0), будет растягивать стимулируемую мышцу. Ее сопротивление растяжению резко падает, когда нагрузка превышает $2P_0$. Мышца *in vivo* также может проходить через все эти состояния в процессе своего нормального функционирования. Активно изменять свою длину мышцы могут только в сторону укорочения. *In situ* они возвращаются к длине покоя под действием внешней силы, развиваемой мышцами-антагонистами и некоторыми эластичными структурами внутри самой мышцы. При сокращении мышцы происходит увеличение ее поперечного сечения в связи с постоянством ее объема.

Если расходуемый АТФ не восполняется метаболическими процессами, мышца становится жесткой – впадает в состояние так называемого ригора (окоченения). Попытки растянуть такую мышцу более чем на несколько процентов приводят к необратимому повреждению.

Скелетно-мышечная механика

Чтобы совершить работу, мышца должна передать усилие своего сокращения внешнему грузу (нагрузке). У позвоночных животных передача усилия достигается с помощью такой механической системы, как скелет с его рычагами, суставами, блоками и прикреплениями мышц.

Наружный скелет членистоногих также состоит из жестких элементов, соединенных суставами. Однако он устроен как защитный панцирь, закрывающий мышцы и другие ткани. Экзоскелет работает по тем же самым принципам механики, что и эндоскелет. Многие беспозвоноч-

ные животные лишены жестких скелетов, но, несмотря на это, даже они, как правило, способны выполнять движения, изменять форму тела и передвигаться с помощью сокращения мышц. Например, у кишечнополостных (полипов) и кольчатых червей имеется гидростатический скелет. В нем противоположно расположенные кольцевые и продольные слои мышц сокращаются, преодолевая сопротивление несжимаемой жидкости, содержащейся в полости животных. Сокращение продольных мышц приводит к укорачиванию тела организма, сокращение кольцевых мышц – к удлинению. Сходным образом происходят движения пищеварительного тракта у позвоночных.

Скорость, с которой сокращающаяся мышца способна передвигать дистальную часть тела (например, ступню) относительно проксимальной части (например, коленного сустава), определяется несколькими факторами. Среди них важными, с точки зрения скелетно-мышечной механики, являются относительное расстояние между суставами и местами прикрепления мышц, пропорция конечностей, длина, сила мышцы и величина приложенной к ней нагрузки. Основные различия в строении скелета разных животных и конечностей данного животного обусловлены адаптацией скелетно-мышечной системы к специфике механической нагрузки. Вспомним из курса элементарной физики простые принципы механики рычагов. Если сравнить с точки зрения этой механики конечности барсука – животного, живущего в норах, и конечности оленя – «скоростного бегуна», то оказывается, что отношение расстояния от пальца ноги (копыта) до центра вращения к расстоянию от пятки до того же центра больше у оленя.

Расположение мышечных волокон относительно сухожилия сильно влияет на функцию скелетно-мышечной системы. В соответствии с этим скорость движения и усилие сухожилий, соединяющих мышцу с костями, зависят как от длины, так и от площади поперечного сечения мышцы. Для саркомера с определенной длиной и сократительными характеристиками установлено, что, чем длиннее мышца, тем выше скорость ее общего укорочения. С ростом площади поперечного сечения мышцы (то есть с ростом числа параллельно расположенных филаментов) увеличивается сила, которую мышца способна развить.

В ходе эволюции у конкретных мышц стали превалировать либо скоростные, либо силовые качества в зависимости от того, по какому пути пошло развитие мышц и скелетных элементов. Интересным примером служат перистая или полуперистая организация мышечных волокон (рис. 29 А), характерная для икроножной мышцы, и противоположная ей параллельная, характерная для портняжной мышцы (рис. 29 Б).

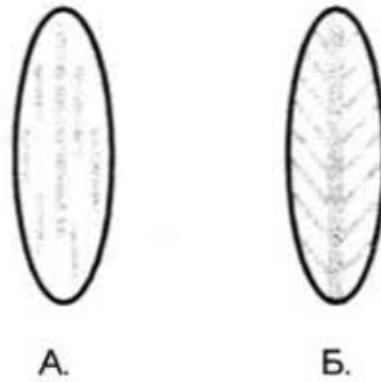


Рис. 29. Варианты расположения мышечных волокон при одинаковой общей длине и массе сравниваемых мышц: перистое расположение волокон позволяет развивать большее усилие, передаваемое сухожилию, тогда как параллельное расположение волокон – более высокую скорость сокращения.

При одинаковых размерах и пропорциях перистая мышца может развить на сухожилии большее напряжение, чем мышца с параллельными волокнами. Дело в том, что перистая мышца имеет большее число волокон, расположенных между местом, откуда они берут свое начало, и местом прикрепления. Зато мышечные волокна перистой мышцы будут, конечно, короче по сравнению с волокнами, параллельно расположенными в мышце такой же массы и размеров. Поэтому перистая мышца не в состоянии развить столь же быстрое общее сокращение, как мышца с параллельными волокнами. Мышцы с параллельными волокнами встречаются там, где важна скорость сокращения, а мышцы с перистым расположением волокон – там, где необходима сила сокращения.

Помимо организации и механики скелета, а также особенностей строения мышц существенное значение для функции скелетно-мышечного аппарата имеют эластические свойства сухожилий. До недавнего времени высокая эластичность, и растяжимость сухожилий сильно недооценивались. Теперь стало очевидным, что во время мышечного сокращения длинные сухожилия подвергаются значительному растяжению и заметно влияют не только на работу мышцы, но и на механику локомоции. При постепенном удлинении сухожилие аккумулирует кинетическую энергию. Эта энергия в виде потенциальной поступает в сухожилие под действием сокращения соответствующей мышцы и внешних сил, стремящихся согнуть сустав, таких, как момент инерции тела. Например, во время бега двуногих животных энергия, аккумулированная в растянутом сухожилии, используется для отрыва пятки от поверхности земли. Наиболее ярко это выражено при прыжках кенгуру.

Механические свойства мышц

Основная функция мышц состоит в преобразовании химической энергии в механическую работу или силу. Главными биомеханическими показателями, характеризующими деятельность мышцы, являются:

- сила, регистрируемая на ее конце (эту силу называют натяжением или силой тяги мышцы),
- скорость изменения длины.

При возбуждении мышцы изменяется ее механическое состояние. Эти изменения называют сокращением. Оно проявляется в изменении натяжения и (или) длины мышцы, а также других ее механических свойств (упругости, твердости и др.). Механические свойства мышц сложны и зависят от механических характеристик элементов, образующих мышцу (мышечные волокна, соединительные образования и т.п.) и физиологического состояния мышцы (возбуждение, утомление и пр.).

Понять многие из механических свойств мышцы помогает упрощенная модель ее строения – в виде комбинации упругих и сократительных компонентов (рис. 33). Упругие компоненты по механическим свойствам аналогичны пружинам, чтобы их растянуть, нужно приложить силу. Работа силы равна энергии упругой деформации, которая может в следующей фазе движения перейти в механическую работу. Различают: а) параллельные упругие компоненты (ПарК) – соединительно-тканые образования, составляющие оболочку мышечных волокон и их пучков, и б) последовательные упругие компоненты (ПосК) – сухожилия мышцы, места перехода миофибрилл в соединительную ткань, а также отдельные участки саркомеров, точная локализация которых в настоящее время неизвестна.

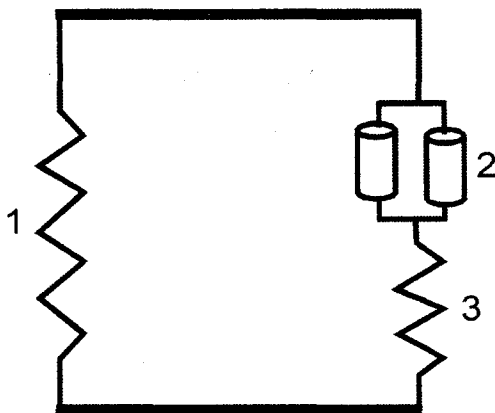


Рис. 30. Трехкомпонентная модель мышцы.
1 – параллельный упругий пассивный компонент (ПарК);
2 – сократительный упругий активный компонент;
3 – последовательный упругий пассивный компонент (ПосК).

Сократительные (контрактильные) компоненты соответствуют тем участкам саркомеров мышцы, где актиновые и миозиновые миофиламенты перекрывают друг друга. В этих участках при возбуждении мышцы происходит механическое взаимодействие между актиновыми и миозиновыми филаментами, приводящее к изменению натяжения и длины мышцы.

Поскольку каждая миофибрилла состоит из большого числа (n) последовательно расположенных саркомеров, то величина и скорость изменения длины миофибриллы в n раз больше, чем у одного саркомера. Сила, развиваемая каждым из них, одинакова и равна силе, регистрируемой на конце миофибриллы (подобно тому, как равны силы в каждом из звеньев цепи, к концам которой приложены растягивающие силы). Эти же самые n саркомеров, соединенные параллельно (что соответствует большему числу миофибрилл), дали бы n -кратное увеличение в силе, но при этом скорость изменения длины мышцы была бы той же, что и скорость одного саркомера. Поэтому при прочих равных условиях увеличение физиологического поперечника мышцы привело бы к увеличению ее силы, но не изменило бы скорости укорочения, и наоборот, увеличение длины мышцы сказалось бы положительно на скорости сокращения, но не повлияло бы на ее силу.

Покоящаяся мышца обладает упругими свойствами: если к ее концу приложена внешняя сила, мышца растягивается (длина увеличивается), а после снятия внешней нагрузки восстанавливает свою исходную длину. Зависимость между величиной нагрузки и удлинением мышцы непропорциональна (не подчиняется закону Гука). Сначала мышца растягивается легко, а затем даже для небольшого ее удлинения надо прикладывать все большую силу (иногда в этом отношении мышцу сравнивают с вязаными вещами: если растягивать, скажем, трикотажный шарф, то вначале он легко изменяет свою длину, а затем становится практически нерастяжимым). Если мышцу растягивать повторно через небольшие интервалы времени, то ее длина увеличится больше, чем при однократном воздействии. Это свойство мышц широко используется в практике при выполнении упражнений на гибкость (пружинистые движения, повторные махи и т. п.).

С уменьшением длины мышцы сила ее тяги снижается. Кроме того, сила сократительных компонентов падает также и при выраженном удлинении мышцы. Это происходит потому, что максимальную силу контрактильные компоненты проявляют при наибольшей величине перекрытия активных участков актиномиозиновых филаментов. При уменьшении или увеличении длины мышцы площадь перекрытия и соответственно число поперечных мостиков, образующихся меж-

ду миозиновыми и актиновыми нитями, уменьшается, соответственно снижается и сила.

Длину мышцы, при которой сила контрактильных компонентов максимальна, называют *длиной покоя*. Если к возбужденной мышце, длина которой меньше равновесной, прикладывается большая внешняя сила (например, при постановке ноги на опору в беге), то мышца растягивается, и в ней возникают упругие силы. Так как длина параллельного упругого компонента не превышает при этом равновесной длины, основной вклад в данной ситуации вносит последовательный пассивный упругий элемент мышцы (рис.30).

Как было показано выше, наличие в мышце параллельных и последовательных упругих элементов, способствует возникновению сил упругой деформации при любой ее длине (например, при отталкивании в беге или при толчке штанги, хотя длина мышц-разгибателей ног при этом далека от максимально возможной).

Для мышц характерно также такое свойство, как релаксация – снижение силы упругой деформации с течением времени. При отталкивании в прыжках с места сразу после быстрого приседания прыжок будет выше, чем при отталкивании после паузы (задержка в приседе) в низшей точке подседа: после паузы упругие силы, возникшие при быстром приседании, вследствие релаксации не используются.

Режимы и механика мышечного сокращения

Если величина натяжения мышцы равна внешнему сопротивлению, то длина мышцы не изменяется. Такой режим мышечного сокращения называется *изометрическим* (от греч. «изо» – равный, «метр» – мера, длина). Если натяжение мышцы не равно внешнему сопротивлению, длина мышцы изменяется – *анизометрический режим* (приставка «ан» – от греч. «не», «без»).

Если натяжение мышцы заметно превышает возникающее внешнее сопротивление, то при этом она укорачивается. Рассмотренный режим мышечного сокращения называется *преодолевающим* (миометрическим, концентрическим; см. Д.Д. Донской, 1975). При натяжении меньшем внешних сил, мышца растягивается (удлиняется). Данный режим называют *уступающим* (плиометрическим, эксцентрическим).

При моделировании мышечной работы в лабораторных условиях можно создать условия, когда мышца, работая в преодолевающем режиме, поднимает какой-либо груз при постоянном натяжении. Такой режим называется *изотоническим* (от греч. «тон» – натяжение). В реальных движениях изотонический режим – исключение, так как величина силы тяги мышц все время меняется. Режим, при котором сила мышцы не ос-

тается постоянной, называют *анизотоническим* (раньше в литературе использовался термин «ауксотонический»).

При сокращении мышцы или отдельного волокна сначала возникает сила тяги в контрактильных компонентах мышцы; при этом на внешнем конце мышцы еще не регистрируется возрастание силы. Затем контрактильные сократившиеся компоненты растягивают последовательные пассивные упругие элементы. И только тогда, когда эти компоненты достаточно растянуты, на конце мышцы регистрируется изменение силы.

Изменение механического состояния контрактильных компонентов мышцы при сокращении называют *активным состоянием*. Доказать, что мышца находится в активном состоянии, можно, например, если в латентный период (то есть во время между стимуляцией мышцы и появлением на ее конце механического ответа) мышцу быстро растянуть, то на ее конце можно зарегистрировать значительное натяжение – гораздо большее, чем при растяжении покоящейся мышцы. Это происходит потому, что быстрое растягивание последовательных упругих компонентов позволяет проявиться активному состоянию контрактильных компонентов.

Есть предположение, что этот механизм (быстрое растягивание ПокК) играет существенную роль при отталкивании в беге и в прыжках. Имеются данные о том, что мышцы-разгибатели (например, икроножная) становятся электрически активными примерно за 15-25 мсек до постановки ноги на опору. Это означает, что импульсация от а-мотонейронов спинного мозга приходит к мышце заранее, еще до момента контакта с опорой. Однако сокращение в мышце за это время развиться не успевает. В опорном периоде ПокК быстро растягиваются, что позволяет проявиться силе контрактильных компонентов мышцы.

Механические характеристики сокращения зависят от величины сопротивления. При увеличении нагрузки (сопротивления, веса груза) происходят три изменения.

1. Латентный период увеличивается. В основном это связано со временем, которое необходимо, чтобы успеть растянуть ПокК до уровня, при котором изометрическая сила тяги превысит на концах мышцы величину сопротивления.
2. Величина изменения длины мышцы (укорочения) уменьшается. Зависимость между величинами преодолеваемого сопротивления и конечной длиной мышцы полностью соответствует описанной выше зависимости типа «длина – сила тяги».
3. Скорость укорочения снижается.

Между силой тяги (F) и скоростью изменения длины мышцы (dV) имеет место обратно

пропорциональная зависимость (рис. 31). Это соотношение силы тяги и длины часто называют уравнением А.В. Хилла (1938) – по имени исследователя, внесшего большой вклад в изучение мышечного сокращения. Зависимость «сила – скорость» имеет многочисленные проявления в спортивной практике. При уступающем режиме сила тяги мышцы также зависит от изменения скорости: если выше скорость удлинения мышцы, то больше и сила, которую она проявляет (при той же степени возбуждения). Здесь необходимо подчеркнуть, что речь идет об изменении скорости, то есть об ускорении, поскольку сила определяется как произведение массы на ускорение ($F=ma$).

При растягивании активной мышцы происходит также накопление потенциальной энергии упругой деформации, которая затем, после перехода с уступающего на преодолевающий режим сокращения, может перейти в кинетическую энергию движущегося звена или всей биомеханической цепи. Такой вариант сокращения мышц со сменой направления движения и с переходом от уступающего к преодолевающему режимам, называют *реверсивным*.

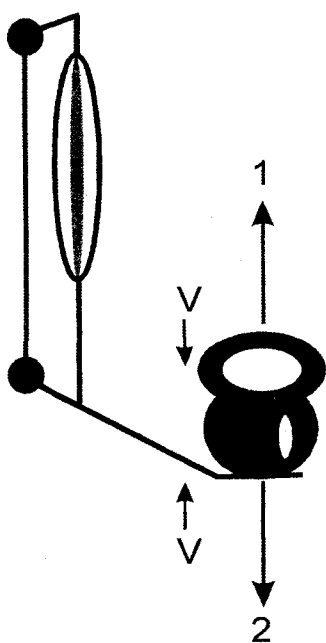


Рис. 31. Виды работы: 1) преодолевающая (скорость уменьшается) и 2) уступающая (скорость нарастает, за счет добавления силы тяжести)

Таким образом, при одной и той же степени стимуляции мышцы ее сила тяги зависит от:

а) длины в данный момент времени; б) скорости изменения длины и в) времени от момента начала стимуляции. Поэтому один и тот же нервный импульс, пришедший к мышце, будет вызывать разный механический эффект, в зависимости от того, в каком состоянии находится возбуждаемая мышца (Н. А. Бернштейн). Таким образом, проявляется зависимость скорости изменения длины мышцы и мощности от силы тяги мышцы.

Мощность, работа и энергия мышечного сокращения

Если мышца сокращается с изменением длины и напряжения, то она выполняет работу. При изометрическом сокращении перемещения нет и поэтому работа (в физическом смысле) отсутствует. Аналогично обстоит дело и с мощностью. В изометрическом режиме она равна нулю, в анизометрическом – произведению силы на скорость изменения длины мышцы. Поэтому величины мощности могут быть рассчитаны из кривой «сила – скорость». Для каждого значения этой кривой мощность равна площади прямоугольника, одна из вершин которого находится на кривой, а вторая – в начале координат. При максимальной стимуляции мышцы ее мощность зависит от скорости сокращения. Максимальное значение мощности отмечается при оптимальных величинах скорости и силы мышцы, равных примерно 1/3 максимальных значений.

Таким образом, максимальная мощность равна примерно 1/10 ($1/3 \times 1/3 = 1/10$) той величины, которая была бы достигнута, если бы в одном и том же сокращении мышца могла проявить одновременно и максимальную силу, и максимальную скорость. При сокращении мышца расходует энергию, которая превращается в работу и тепло. В изометрическом режиме, когда механическая работа равна нулю, вся освобожденная в результате химических реакций энергия превращается в тепло. В анизометрическом режиме одна часть энергии затрачивается на совершение механической работы, а другая часть переходит в тепловую. Отношение выполненной работы к общим затратам энергии (работа + тепло) называется, как известно, коэффициентом полезного действия (КПД). В мышцах его величина зависит от скорости ее сокращения. Он максимален при скорости, равной примерно 20% от максимальной.

Резюме

Двигательный аппарат человека представляет собой систему, состоящую из костных звеньев, приводимых в движение сокращением мышц. Соединенные последовательно кости формируют биопары, а их последовательное подвижное объединение образует биоцепи.

Биозвенья в парах, выступают в роли рычагов, которые служат для передачи силы с одного плеча на другое. В рычагах форма движения – вращение. Здесь перемещение плеча происходит под воздействием момента силы, как произведения ее модуля на соответствующее плечо. Биозвенья или биоцепи можно моделировать не только рычагами, но и маятниками.

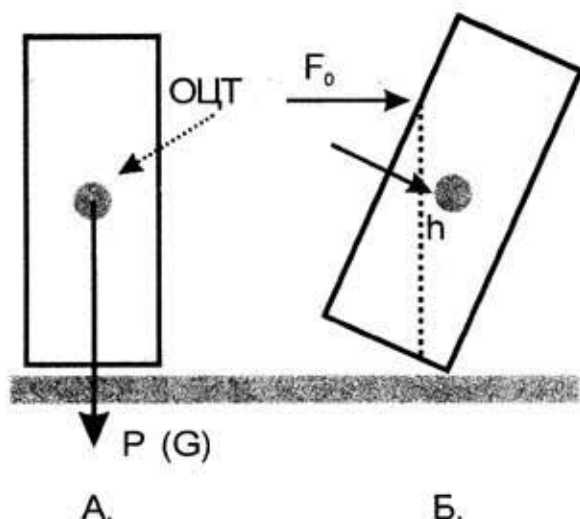
Мышцы рассматриваются как машины, преобразующие химическую энергию в механическую с неизбежными тепловыми потерями. Эффективность этого преобразования не превышает 20-22%. Вместе с тем за счет упругих, механических свойств КПД мышечной работы может быть значительно повышен.

Вопросы для повторения и закрепления материала главы

1. Определение состава и свойств биомеханической системы тела человека.
2. Биозвенья, биопары, биоцепи.
3. Степени свободы в биопарах и цепях.
4. Что такое рычаги, особенности проявления «правила рычага» в движениях человека. Маятники, их момент инерции.
5. Механические и биологические свойства мышц их анализ.
6. Эффективность мышечного сокращения.
7. Энергия, сберегаемая упругость.
8. Рекуперация энергии в мышцах.
9. Режимы сокращения и работа мышц.
10. Работа и энергия мышечного сокращения.

Глава 7. Движения вокруг осей

движения является сила, то вращательное движение создает и изменяет его – момент силы, равный произведению модуля силы на ее плечо приложения. Любая сила, линия действия которой не проходит через центр масс тела, создает вращающий момент относительно одной из центральных осей тела (рис. 32 А). Сила, линия действия которой проходит через ОЦТ тела момента не создает, так как ее плечо равно нулю (рис. 32 Б). Рис. 32. Вращающее действие силы (F_0), не про-



ходящей через ОЦТ. Она формирует момент вращения как произведение самой силы F_0 на ее плечо h (часть Б.) и действие силы тяжести или веса тела, $P(G)$, прижимающее тело к опоре (А.)

В движениях вокруг осей происходит удержание звеньев или всего тела на криволинейных траекториях (или изменяется кривизна траектории движения тела), а также происходит продвижение по траектории. Движения вокруг осей всегда включают в себя вращательное движение, но кроме него могут содержать и радиальное (поступательное) перемещение вдоль радиуса к центру или от центра, что влечет изменение и самого вращательного движения. Для твердого тела радиус кривизны траекторий его точек не изменяется и кривизна траектории (отрезка дуги окружности) постоянна. Для системы тел, если она не изменяет конфигурацию, будут такие же условия. Если же система тел деформируется так, что радиусы траекторий точек изменяются, то к вращательному движению добавляется радиальное перемещение.

Особенности вращательного

движения звена или тела в целом

Как и сила, ускорение может изменяться по величине и направлению. Движение тела вокруг оси происходит при наличии центростремительного ускорения, вызванного воздействием ускоряющего тела.

В криволинейном движении изменение направления скорости в сторону центра вращения вызвано действием другого тела. Возникает нормальное (радиальное) ускорение, направленное к центру вращения (центростремительное ускорение). Оно вызвано действием силы, имеющей то же направление (центростремительная сила). Источником этой силы служит другое тело, которое удерживает точки вращающегося тела на дугах окружностей. Оно ограничивает движение, не дает продолжаться инерционному движению по касательной к дуге окружности, заставляет описывать криволинейные траектории. Его называют поэтому *удерживающим телом*. Например, удерживающим телом при движении звена в суставе служит соединенное с ним соседнее звено. Центростремительной силой служит реакция связи со стороны соседнего звена на тягу мышц и суставно-связочного аппарата. Она приложена через этот соединяющий аппарат к вращающемуся звену и заставляет его удерживаться на криволинейных траекториях его точек. Ось вращения звена, связанная с удерживающим телом (другим звеном), представляет собою закрепленную ось.

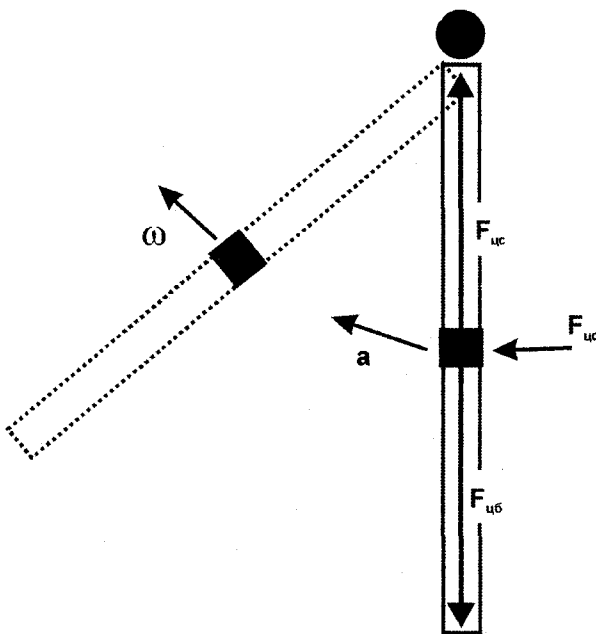
Вращающееся звено оказывает противодействие реакции удерживающего действия в виде центробежной силы. Она направлена противоположно центростремительной силе, равна ей по величине и приложена к удерживаемому звену. Центробежная сила в данном случае это реальная сила инерции (система отсчета инерциальная, тело отсчета – неподвижное соседнее звено). Если же систему отсчета связать с самим вращающимся звеном, движущимся ускоренно (неинерциальная система отсчета), то и сила инерции будет рассматриваться как фиктивная; она приложена к ЦМ самого вращающегося звена. Как известно, систему отсчета выбирают в соответствии с поставленной задачей. Оба способа описания одного и того же явления в принципе равнозначны.

Величина центростремительного ускорения зависит от скорости и расстояния до оси вращения. С увеличением скорости вращения и кривизны траектории центростремительное ускорение (a) возрастает согласно уравнению:

$$a = V^2/r$$

Центростремительная сила перпендикулярна направлению линейных скоростей точек звена, поэтому изменить их величину не может. Она изменяет только направление скорости. Изменение же величины скорости при вращении происходит при наличии положительного или отрицательного тангенциального (касательного) ускорения (рис. 33). Его может вызвать только сила (или ее тангенциальная составляющая), перпендикулярная к радиусу (параллельная касательной к траектории в данной точке).

Следовательно, при анализе движения звена вокруг оси необходимо различать силы (или их составляющие), приложенные вдоль радиуса и перпендикулярно к нему. Первые искривляют траекторию, а вторые ускоряют или замедляют вращение. Рис. 33. Взаимодействие центростремительной



(ЦСС), центробежной (ЦБС) и тангенциальной ($F_{тан.}$) сил при вращательном движении вокруг оси: a – ускорение под действием тангенциально (перпендикулярно радиусу) приложенного момента силы, ω – угловая скорость

Изменение вращательного движения звена

Под действием момента внешней силы (приложенной к звену по касательной к траектории) изменяется вращательное движение звена, увеличивается или уменьшается его угловая скорость. Поскольку к любому телу всегда приложены тормозящие силы, то изменение движения в сторону большего момента вызывается только разностью между моментами движущих и тормозящих сил. Момент внешней силы, приложенной

к звену, вызывает его угловое ускорение, обратно пропорциональное моменту инерции звена относительно оси вращения:

$$Mr(F) = J \cdot e,$$

где $Mr(F)$ – момент внешней силы (F) относительно оси r , J – момент инерции относительно той же оси, e – угловое ускорение звена.

Внешними силами для звена служат тяги мышц, прикрепленных к нему, реакции соседних звеньев и приложенные к нему силы, внешние для тела (например, силы тяжести или инерции отягощений). Импульс момента силы (Sz) вызывает соответствующее изменение угловой скорости звена, следовательно, и его кинетического момента ($Sz = \omega J W$).

Достижение угловой скорости, зависит от ускоряющего импульса момента внешней силы и момента инерции звена:

$$\omega = Sz/J$$

Поскольку момент инерции жесткого звена постоянный, достижение заданной скорости зависит от ускоряющего импульса силы, то есть от разности моментов движущих и тормозящих сил и времени их приложения.

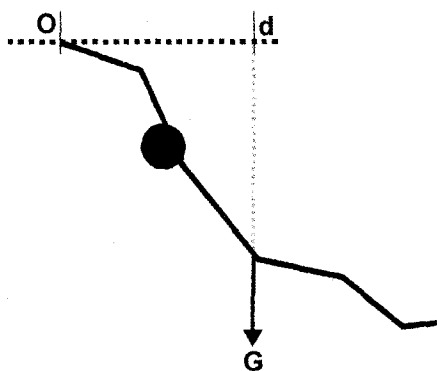
Для большей скорости вращения звена нужно увеличить момент силы тяги движущих мышц и уменьшить момент силы тяги тормозящих. Следует напомнить, что для суставов тела человека наиболее характерно возвратно-вращательное (колебательное) движение, ограниченное анатомическими условиями.

Изменение вращения системы звеньев возможно под действием импульсов моментов, как внешних сил, так и внутренних, вызывающих радиальное движение (вдоль радиуса тела).

Если человек сохраняет позу (например, в висе на кольцах), то можно, приложив момент внешней силы (толчком рукой), увеличить угловую скорость движения его тела. В этом случае тело гимнаста можно приравнять к твердому телу. Если же гимнаст изменяет позу, то нельзя определить угловую скорость его тела так, как это делается для твердого тела, поскольку угловая скорость твердого тела (отношение линейной скорости любой точки тела, кроме лежащих на оси, к ее расстоянию до оси) для всех его точек одинакова, а при изменении позы линейные скорости разных точек изменяются по-разному и единой угловой скорости, как у твердого тела, не существует.

Таким образом, момент внешней силы, приложенной к телу гимнаста, изменяет вращательное движение (рис. 34). Так, при свободных качаниях гимнаста в висе на перекладине, когда он дви-

жется вниз, момент силы тяжести тела относительно оси перекладины ускоряет движение. Во время движения вверх момент силы тяжести замедляет движение, так как действует ему навстречу.



Р и с .

34. Приложение момента внешней силы (силы тяжести: $M = Gd$)

Если бы не было тормозящего действия силы трения рук о перекладину и сопротивления воздуха, качания продолжались бы без изменения. Действие этих тормозящих сил обуславливает затухающие колебания. Можно описать это явление с точки зрения превращения механической энергии тела гимнаста. При опускании тела из верхнего положения в нижнее потенциальная энергия (энергия положения) превращается в кинетическую (энергию движения); по мере подъема тела вверх – кинетическая энергия вновь превращается в потенциальную; часть механической энергии затрачивается на работу против тормозящих сил и рассеивается.

Подводя энергию в каждом колебании, можно сделать колебания незатухающими и, более того, увеличить энергию по механизму резонанса (подвод энергии больший, чем рассеивание). Одним из источников такого подвода энергии служит работа мышц по приближению звеньев тела к оси вращения. Это вызывает уменьшение радиуса вращения и радиуса инерции, а следовательно, и момента инерции тела гимнаста.

Изменение вращательного движения системы тел без приложения внешней силы можно объяснить также, основываясь на законе сохранения кинетического момента. Приближая части системы тел (тело гимнаста) внутренними силами (тяги мышц) к оси вращения, можно уменьшить радиус инерции, а значит, и момент инерции. Если в это время никакие внешние силы не изменяют кинетического момента ($J\omega$), например, в движении без опоры, то можно прогнозировать то, что во сколько раз уменьшится момент инерции (J), во столько же раз увеличится угловая скорость (ω). Это пример управления вращательным движением, где цель управления – измене-

ние угловой скорости для решения конкретной двигательной задачи.

Способы управления движениями вокруг осей

Эти способы можно разделить на две большие группы:

- а) с изменением кинетического момента системы (Sz) и
- б) с сохранением кинетического момента системы на постоянном уровне ($Sz = \text{const}$).

Из закона сохранения кинетического момента следует, что если сумма моментов внешних сил, приложенных к телу, равна нулю то кинетический момент тела сохраняется неизменным ($\sum M = M_1 + M_2 + M_n = 0$).

Управление движениями вокруг осей с изменением кинетического момента биомеханической системы осуществляется моментами внешних сил, для чего нужен их источник – внешнее физическое тело.

Вращательное движение биомеханической системы можно изменить путем приложения момента внешней силы, при сохранении телом позы. Например, тренер, раскачивая тело гимнаста в висе на кольцах, приложением своей мышечной силы увеличивает или уменьшает вращение. Сам спортсмен напряжением мышц пассивно сохраняет позу.

У биомеханической системы есть еще возможность изменять вращение, изменяя плечо внешней силы, благодаря движениям звеньев тела. Например, если гимнаст выполняет размахивания на перекладине, сила тяжести (постоянная) его тела как маятника совершает положительную работу (при движении вниз в вертикальной плоскости) или отрицательную (при движении из нижнего положения вверх). Для того, чтобы увеличить механическую энергию тела (маятника), надо сделать отрицательную работу меньше положительной. При подъеме вверх следует уменьшить момент силы тяжести, чтобы достичь этого гимнаст, притягиваясь к перекладине, укорачивает маятник и тем самым уменьшает плечо силы тяжести. Таким образом, уменьшается тормозящее действие силы тяжести при движении вверх.

Если же при движении вниз увеличивать плечо силы тяжести, то момент силы тяжести станет больше. Но с удлинением маятника увеличивается его момент инерции – пропорционально квадрату радиуса инерции. Вследствие этого нарастание скорости станет не больше, а меньше. При движении вверх, укорачивая маятник, уменьшают и момент силы тяжести, и момент инерции; и то и другое несколько замедляет падение скорости. С уменьшением приведенной длины маятника уменьшается период и увеличивается скорость колебаний.

Для создания момента внешней силы спортсмен может активно действовать (отталкиваться или притягиваться), что ведет к изменению длины тел, а, следовательно, и моментов действующих сил. Например, несимметрично отталкиваясь ногами от опоры или руками от перекладины, можно вызвать вращение вокруг продольной оси тела.

Следовательно, можно заключить, что управление вращательными движениями, при условии подвода энергии извне (с изменением кинетического момента системы) достигается:

1. при помощи внешней силы (импульса момента силы), при этом наблюдается ускорение или замедление вращения всего тела, при заданном сохранении позы;

2. с помощью внешней силы при закреплённой оси (например, приближением к ней и удалением от нее) – ускорение или замедление вращения всего тела с изменением позы;
3. отталкиванием от опоры или притягиванием к ней, что создает ускорение или замедление вращения всего тела при изменении позы. Это достигается активным созданием момента внешней силы.

В выше приведенном анализе и примерах моменты внешних сил приложены к телу и изменяют его движение. Эти механизмы управления вращением применимы как при движении с опорой, так и в полете (как в случае создания или наличия начального вращения, так и без него).

Резюме

Кинематика вращательного движения в гимнастике представляет собой угловые перемещения тела гимнаста. Эти перемещения выполняются либо в безопорном положении (вольные упражнения, соскоки со снарядов), или с опорой на снаряд, гимнастический помост и др.

Динамика вращательного движения в гимнастике связана с действием момента силы, как произведения силы на ее плечо.

Это создает угловое ускорение и угловую скорость. Необходимо иметь в виду, что угловая скорость не зависит от радиуса вращения. Вместе с тем, линейная скорость точки тела, движущаяся по окружности, пропорциональна расстоянию от центра вращения.

Одна из ведущих закономерностей углового движения связана с тем, что угловая скорость (ω) находится в сильной зависимости от момента инерции тела ($J = mr^2$). Эта зависимость имеет вид: $Q(Sz) = J \cdot \omega$, следовательно $\omega = Q/J$. Поскольку момент инерции зависит от радиуса вращения тела (обусловленного изменением позы тела), то его величина может быть целью управления в гимнастике, акробатике, фигурном катании и др.

Вопросы для повторения и закрепления материала главы

1. Причины возникновения и изменения вращательного движения тела.
2. Вращательные движения, его определение.
3. Виды вращательных движений в гимнастике и акробатике.
4. Момент силы и момент инерции вращающегося тела.
5. Кинетический момент тела, как произведение момента инерции на угловую скорость.
6. Выполнения вращений с опорой и без опоры.
7. Взаимодействие тела человека с опорой как причина изменений движений вокруг осей.
8. Основные способы управления движениями вокруг осей (Приложение силы, изменение радиуса инерции, активное создание момента внешней силы, группирование разгруппирование тела, встречные круговые движения конечностями).

Глава 8. Сохранение и изменение положения тела

Сохранение положения тела относится к разделу механики, называемому статикой. В статике твердого тела рассматриваются свойства сил, приложенных к твердому телу. При их сбалансированном воздействии может наступить неподвижное состояние тела. Такие задачи возникают в биомеханике. Требуется сохранить устойчивое положение тела на нижней опоре.

Основная двигательная задача при сохранении и изменении положения тела заключается в обеспечении равновесия без перемены опоры, как при постоянной позе, так при ее изменении. В физических упражнениях человеку нередко бывает необходимо сохранять неподвижное положение тела: исходные (стартовые и др.), конечные (фиксирование штанги после ее поднятия и т. п.), промежуточные (упор углом на кольцах и др.). Во всех таких случаях тело человека как биомеханическая система находится в равновесии. В равновесии могут находиться и внешние тела, связанные с человеком, сохраняющим положение (например, штанга, партнер в акробатике).

Положение тела человека определяется: 1) позой (взаимным расположением звеньев тела), 2) местоположением, 3) ориентацией относительно системы отсчета и 4) отношением к опоре. Для сохранения положения тела нужно закрепить звенья в суставах и не допускать, чтобы внешние силы изменяли его местоположение, ориентацию в пространстве (исключить перемещения и повороты) и связь с опорой. Названные задачи решаются посредством уравнивания действующих на человека сил и их моментов. Основу сохранения положения тела составляет уравнивание сил.

Силы, проявляющиеся при сохранении положения тела

К биомеханической системе могут быть приложены силы тяжести, реакции опоры, веса, мышечные тяги, а также усилия партнера или противника и др. Все силы могут действовать как возмущающие (нарушающие положение) и как уравнивающие (сохраняющие положение), в зависимости от положения звеньев тела относительно их опоры. Силы тяжести (дистантные, действующие на расстоянии) приложены к ЦМ звеньев и ОЦМ тела (рис. 35). В зависимости от конкретных особенностей положения тела они могут либо быть направленными на изменение положения, либо уравнивать другие возмущающие (отклоняющие, опрокидывающие) силы.

Реакции опоры как противодействие опоры действию на нее тела, чаще всего совместного с другими силами, уравнивают опорные зве-

нья, закрепляют их неподвижно. Вес звеньев тела (контактные силы) приложен внутри тела человека к соседним звеньям как следствие земного тяготения, действия сил тяжести.

Силы мышечной тяги при сохранении положения обычно уравнивают своими моментами моменты силы тяжести соответствующих звеньев и веса, связанных с ними других звеньев. Эти силы могут и изменять положение тела, и восстанавливать его. Силы тяги мышц сохраняют позы, фиксируя положение звеньев в суставах. Именно управляя мышечными силами, человек сохраняет положение своего тела.

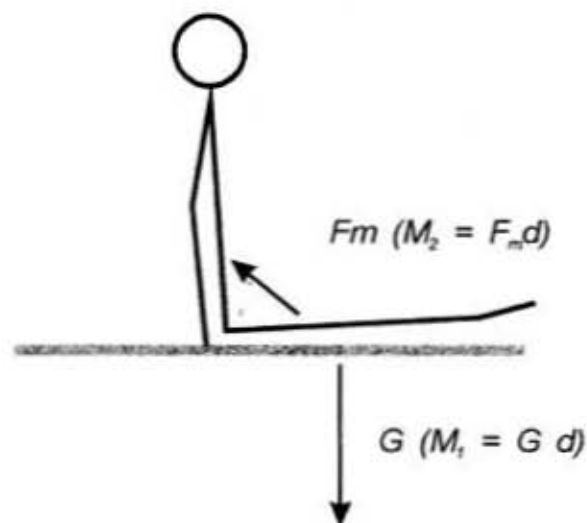


Рис. 35. Условия равновесия – сила тяжести (G) действует на ее плечо, создавая момент относительно тазобедренного сустава. Сила мышечных тяг (F_m) создает противомoment ($F_m d$). В результате ноги гимнаста находятся в равновесии и сохраняют позу – упор углом.

Условия уравнивания действия сил

Для уравнивания действия на тело всех сил необходимо, чтобы главный вектор и главный момент внешних сил были равны нулю, а все внутренние силы обеспечивали сохранение позы. Все внешние силы можно условно привести к ЦМ тела (присоединяя соответствующие моменты силы). Равнодействующая сил, приложенных к ЦМ, – главный вектор – обуславливает его линейное ускорение. Если главный вектор равен нулю, то ЦМ не изменит своей скорости (а если она равна нулю, то и своего положения). Сумма всех моментов внешних сил, приложенных к телу, дает главный момент. Он обуславливает угловое ускорение тела. Если главный момент и главный вектор равны нулю, то тело не изменяет своего положения. Ина-

че говоря, в этом случае внешние силы не могут ни сдвинуть, ни повернуть тело – его положение останется неизменным. В случае, когда до приложения рассматриваемых (уравновешенных) сил и их моментов тело двигалось, они не изменяют этого движения. Это частный случай уравнивания сил, но не сохранения положения. Так, например, можно сохранить позу, но не положение в движении без опоры (в полете) или на опоре (спуск в санном спорте). Следует подчеркнуть, что для сохранения положения всего тела необходимо сохранение его позы (как бы отверждение тела).

Устойчивость и равновесие тел, опирающихся на плоскость

Критерием для определения вида равновесия тела является действие силы тяжести при малейшем отклонении тела от вертикали: а) устойчивое – возвращение тела в прежнее положение при любом отклонении, б) ограниченно-устойчивое – возвращение тела в прежнее положение только при отклонении в определенных границах, в) неустойчивое – обязательное опрокидывание при малейшем отклонении. В том случае если при отклонении тела его ОЦМ поднимается вверх, то потенциальная энергия тела (в поле тяготения Земли) увеличивается, и сила тяжести образует момент, направленный на восстановление положений, – это пример устойчивого равновесия. Оно характерно для верхней опоры, когда тело к ней подвешено (рис. 36, А).

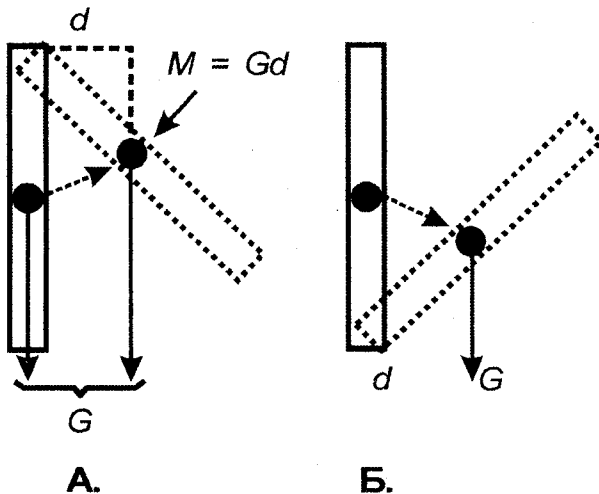


Рис. 36. Тело на верхней опоре (А). Отклонение от вертикального положения – ОЦМ поднимается и возникает момент силы тяжести ($M=Gd$), который возвращает тело к вертикальному положению равновесия. Б – тело на плоской, нижней опоре. Отклонение его от вертикального положения на величину, большую, чем угол устойчивости, приводит к возникновению опрокидывающего момента силы тяжести ($M_{опр.} = Gd$) и потере равновесия. При нижней опоре тело можно отклонять лишь

до тех пор, пока линия тяжести (или проекция ЦМ на горизонтальную плоскость) не дойдет до границы площади опоры. До этой границы сила тяжести образует момент устойчивости, который может восстановить положение равновесия. По мере отклонения тела его ЦМ поднимается вверх, что требует затрат работы, которая увеличивает энергию тела. Если же продолжать опрокидывать тело, перейдя эту границу, потенциальная энергия начнет уменьшаться (преодоление «потенциального барьера»), момент силы тяжести станет уже опрокидывающим моментом.

Неустойчивое же равновесие встречается только при нижней опоре в виде точки опоры или линии. Достаточно отклонить тело в любую сторону, как его ЦМ опускается ниже, потенциальная энергия уменьшается, момент силы тяжести оказывается опрокидывающим.

Такого равновесия в природе не существует – это абстрактная модель. В реальных условиях малейшее отклонение прекращает такое равновесие.

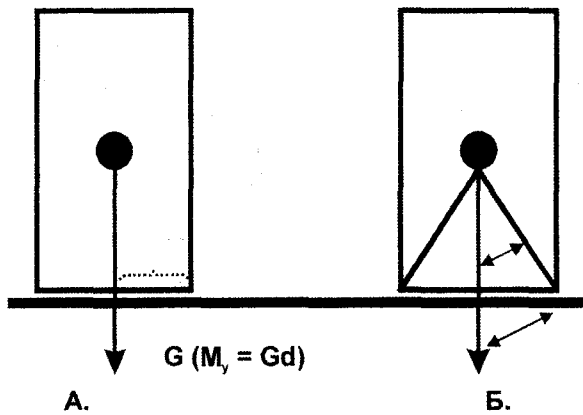
Таким образом, неустойчивого и безразличного равновесия для тела человека практически не существует, а устойчивое равновесие наблюдается только при верхней опоре (в висах), а ограниченно-устойчивое – при нижней опоре.

Степень устойчивости тела человека в разных положениях характеризуется его статическим показателем – коэффициентом устойчивости (способностью сопротивляться нарушению устойчивости в определенных направлениях), а также динамическим – углом устойчивости (способностью восстанавливать положение). На практике наиболее важно определить устойчивость для ограниченно-устойчивого вида равновесия. При этом не следует смешивать вид равновесия со степенью устойчивости. Вид равновесия определяет лишь основы сохранения положения. Показатели же устойчивости определяют меру возможностей сохранения положения.

Статический показатель устойчивости характеризует отношение двух моментов силы: момента устойчивости ($M_y=Gd$) к моменту опрокидывания ($M_o=Fd$), $K_y = M_y/M_o$. Это соотношение называется *коэффициентом устойчивости*. Момент устойчивости равен произведению силы тяжести тела на ее плечо относительно линии опрокидывания в самом начале отклонения от положения покоя (рис. 37, А).

При нарастании отклонения плечо силы тяжести укорачивается, а момент устойчивости становится меньше. Что касается момента опрокидывания, то он равен произведению опрокидывающей силы на ее плечо относительно той же линии опрокидывания. Когда коэффициент устойчивости больше единицы, то тело не опрокинуть. Он характеризует способность тела своей силой тяжести сопротивляться опрокидыванию в данных условиях.

Рис. 37. Показатели устойчивости твердого тела



на нижней плоской опоре: А – момент устойчивости; Б – угол устойчивости (\leftrightarrow)

Существует динамический показатель устойчивости, который определяется углом устойчивости. Угол устойчивости образован линией действия силы тяжести и прямой, соединяющей центр тяжести с соответствующим краем площади опоры (рис. 37 Б). Следовательно, угол поворота α , на который следует повернуть тело, чтобы перевести его из устойчивого положения в неустойчивое (например, в спортивных единоборствах это важная двигательная задача), называется углом устойчивости. Он тем больше, чем шире основание тела и чем ниже расположен его центр тяжести (рис. 38).

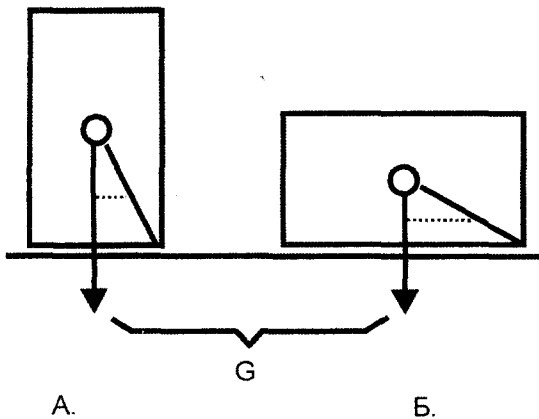


Рис. 38. Изменение величины угла устойчивости при разной высоте ОЦТ тела и размеров опоры

Если тело перемещается на его другую плоскость (рис. 38 Б), то угол устойчивости будет больше. Для его опрокидывания в этом случае потребуется поворот на больший угол. Это обстоятельство широко используется в практике спорта для создания относительно устойчивых положений.

Способность тела возвращаться к первоначальному положению равновесия по прекращению действия на тело сил, нарушающих это равновесие, называется *динамической устойчивостью тела*. Если твердое тело опирается не всем

основанием, а несколькими точками, не лежащими на одной прямой, то за площадь опоры надо принимать площадь, образуемую линиями, соединяющими эти точки.

Для того чтобы отклонить тело до положения, когда его ОЦМ окажется над линией опрокидывания (граничное положение тела над вершиной потенциального барьера), и возникнет неустойчивое равновесие, нужно повернуть его в соответствующей вертикальной плоскости на определенный угол α .

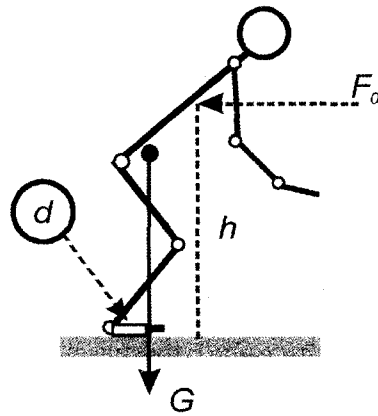


Рис. 39. Взаимодействие между моментом устойчивости ($M_y = Gd$) и моментом опрокидывания ($M_o = Fh$), где h – плечо опрокидывающей силы F

Если ОЦМ тела расположен ниже, а его проекция дальше от края опоры, то момент устойчивости восстановит положение на большем пути отклонения, запас возможностей для восстановления положения больше, степень устойчивости выше. Угол устойчивости показывает, в каких пределах еще действует момент устойчивости.

Способность тела сопротивляться всякому, хотя бы и малому, нарушению его равновесия, называется статической устойчивостью тела.

Статический и динамический показатели устойчивости в полной мере применимы для оценки положения только твердого тела или тела человека, когда поза его совершенно неизменна.

Для тела человека (как биомеханической системы) при оценке устойчивости положения надо учитывать еще ряд обстоятельств. Во-первых, поверхность опоры почти всегда больше площади эффективной опоры. Это значит, что линия опрокидывания всегда расположена внутри границы поверхности опоры. Мягкие ткани и недостаточно сильные мышцы не могут уравновесить нагрузку, и опрокидывание будет раньше, чем линия тяжести пересечет край опорной поверхности. Во-вторых, тело человека при попытке опрокидывания чаще всего не сохраняет позы, а изменяет свою конфигурацию, его звенья перемещаются в тех или иных суставах.

Следовательно, показатели устойчивости твердого тела в применении к телу человека только в самой общем виде дают возможность оценить механические условия его устойчивости. Необходимо заметить, что здесь рассматривались только условия рав-

новесия тела, находящегося под действием силы тяжести. При сохранении положения тела человека приходится уравнивать не только силу тяжести, но и многие другие силы. С точки зрения задачи уравнивания сил, можно выделить три вида статической работы мышц:

1. Удерживающая работа – против момента силы тяжести; моментами сил тяги мышц уравновешены моменты силы тяжести звеньев.
2. Укрепляющая работа – против сил тяжести, действующих на разрыв; силы мышечной тяги укрепляют сустав, принимают на себя нагрузку.
3. Фиксирующая работа – против сил тяги мышц-антагонистов и других сил; силы мышечной тяги лишают звено возможностей движения, действуя друг против друга по направлению, но совместно – по задаче.

С точки зрения механики, это одинаковые случаи – уравнивание сил. С другой стороны, с позиций биомеханики здесь имеется качественное различие в двигательной задаче и в управлении мышцами при ее решении.

Из повседневной практики известно, что человек может не только сохранять равновесие, но и восстанавливать его в случаях нарушения. Различие в равновесии биомеханических систем и твердых физических тел заключается не в особых законах механики для живых систем, а в более сложной реализации тех же законов из-за особенностей живых систем.

Устойчивость тела человека определяется его возможностями активно уравнивать возмущающие силы, останавливать начинающееся отклонение и восстанавливать положение. Уравнивание возмущающих сил в неживых системах происходит только пассивно, а в живых организмах, напротив – в основном активно. Уравнивающие силы могут действовать как собственно уравнивающие, а также как останавливающие отклонение и восстанавливающие положение.

Уравнивание возмущающих сил, как уже говорилось, происходит в том случае, когда главный вектор и главный момент всех внешних сил равны нулю. Силы тяги мышц (уравнивающие силы) никогда не бывают постоянными. Поскольку человек может использовать для сохранения положения тела только площадь эффективной опоры, то ей соответствует находящаяся над ней зона сохранения положения. Человек может расположить проекцию ОЦМ своего тела в любом месте этой зоны и сохранять положение. Величина зоны сохранения положения зависит от физических сил человека (возможности сохранения позы) и уровня его технической подготовленности (навык сохра-

нения положения). В пределах этой зоны он может остановить начавшееся отклонение. Внутри зоны сохранения положения можно выделить меньшую зону положения ОЦМ тела – оптимальную. В пределах ее человек лучше всего сохраняет требуемое положение. Когда колебания тела выводят ОЦМ из оптимальной зоны, устойчивость еще достаточная, но требует для поддержания более значительных усилий. И лишь когда колебания тела выведут ОЦМ тела за пределы зоны сохранения положения, наступает опрокидывание. Механическая система уже не может в этом случае сама под действием только силы тяжести восстановить положение. Без дополнительного внешнего воздействия падение неизбежно.

Человек, стремясь сохранить положение (даже утратив равновесие), с помощью активных действий еще может восстановить положение в известных пределах отклонения. Зона восстановления положения – это область, в которой уже невозможно статическое равновесие, но из которой человек еще способен активными действиями вернуться в заданное положение.

Необходимо заметить, что размеры всех зон (оптимальной, зоны сохранения и зоны восстановления положения) имеют большие индивидуальные различия. Они зависят от уровня развития физических качеств, двигательных навыков, физического и эмоционального состояния спортсмена. Устойчивость тела, конечно, связана с механическими условиями равновесия тела, но определяется главным образом другими факторами. Так, при стойке на руках на плоской горизонтальной опоре зона сохранения равновесия в переднезаднем направлении составляет всего 45-65% от размеров площади опоры в этом направлении.

При упражнениях на снарядах с использованием хвата имеют место удерживающие связи, создаются иные условия, чем при недерживающей связи (на опоре). При стойке на руках на стоялках (поперек), при удерживающей опоре, зона сохранения равновесия в том же направлении достигает 110-150% от размеров площади опоры. Моменту силы тяжести тела противодействует момент, образованный захватом кистью опорного снаряда. Эти данные значительно варьируют не только у разных спортсменов, но при повторном исполнении у одного и того же спортсмена.

При выполнении основных движений в спорте часто второй двигательной задачей является сохранение устойчивости тела, расположенного на нижней опоре. Это достигается управлением уравнивающими и восстанавливающими силами при компенсаторных, амортизирующих и восстанавливающих движениях. Компенсаторные движения направлены на предупреждение выхода ЦМ тела за пределы зоны сохранения положения при возмущающих воздействиях и при собственных движениях на месте. Ком-

пенсаторные движения нейтрализуют воздействие возмущающих сил на ОЦМ тела. Эти движения выполняются обычно одновременно с отклонениями и, как правило, автоматически.

Амортизирующие движения уменьшают эффект действия возмущающих сил. Это обычно уступающие движения, которые направлены в сторону действия возмущающей силы. Они замедляют начавшееся отклонение и останавливают его. Их выполняют (как и компенсаторные движения) одновременно с действием возмущающих сил.

И третья группа сил, направленных на сохранение равновесия тела на нижней опоре, – восстанавливающие движения. Они обеспечивают возвращение ОЦМ тела в зону сохранения положения из зоны восстановления положения. В ряде случаев восстанавливающие движения нередко не только устраняют отклонения от равновесного положения, но и вызывают противоположное отклонение (это будет гиперкоррекция).

Для достижения необходимого уровня коррекции положения необходимы новые восстанавливающие движения (вторичная коррекция). Таким образом, можно заключить, что, сохраняя положение, человек управляет своими движениями, активно противодействует сбивающим силам. Это принципиально отличает его действия от пассивного уравнивания неживых тел.

Устойчивость тела человека рассматривают иногда как самостоятельное двигательное качество. Это имеет смысл, поскольку биомеханические механизмы устойчивости отличаются от тех, которые обеспечивают высокую выносливость, силу, быстроту, гибкость и ловкость.

В основе устойчивости, как и вообще в основе координации движений, лежит принцип обратной связи. Отклонение от устойчивого положения вызывает действия, направленные на ликвидацию отклонения.

Все *локомоции* (*locus* – место; *motio* – пере-

Резюме

Основная двигательная задача при сохранении и изменении положения тела заключается в обеспечении равновесия без перемены опоры, как при постоянной позе, так при ее изменении.

При решении задачи сохранения равновесия, рассматривают положение тела. Оно определяется: 1) позой (взаимным расположением звеньев тела), 2) местоположением, 3) ориентацией относительно системы отсчета и 4) отношением к опоре.

Для сохранения положения тела нужно закрепить звенья в суставах и не допускать, чтобы внешние силы или их моменты изменяли его положение, ориентацию в пространстве, а также связь с опорой.

Эти задачи решаются посредством уравнивания действующих на тело человека сил или моментов сил. Поэтому основу сохранения положения тела составляет уравнивание сил.

Для уравнивания действия на тело всех сил необходимо, чтобы главный вектор и главный момент внешних сил были равны нулю, а все внутренние силы обеспечивали сохранение избранной позы.

Все внешние силы, действующие на тело можно привести к его ОЦТ. Равнодействующая сил, приложенных к ОЦТ тела, является главным вектором и обуславливает его линейное ускорение.

Сумма всех моментов внешних сил, приложенных к телу, является главным моментом.

Статика гимнастики связана с задачей сохранения устойчивости тела на нижней опоре. Для этого необходимо выделить статические (моменты устойчивости и коэффициент устойчивости) и динамические (углы устойчивости) критерии устойчивости.

Вопросы для повторения и закрепления материала главы

1. Биомеханика гимнастики. Сохранение положений и поз.
2. Условия равновесия тел.
3. Силы приведенные к общему центру тяжести (ОЦТ). Главный вектор внешних сил.
4. Моменты сил, приложенных к телу. Главный момент.
5. Виды равновесия.
6. Показатели устойчивости на нижней опоре.
7. Управление позой и положением тела, относительно опоры или подвеса.

Глава 9. Общие основы наземных локомоций (биомеханика ходьбы, бега и прыжков)

мещение) характеризуются перемещением тела в пространстве при помощи мышечных усилий человека или животного. Среди наземных перемещений наибольшее распространение имеют шагательные локомоции. К ним относятся перемещения относительно опоры без специальных приспособлений (ходьба, бег, прыжки, плавание), а также с механическими преобразователями движений (велосипед, гребля).

Для понимания взаимодействия человека с опорой необходимо разобрать общую динамику передвижения биомеханической системы человека как самодвижущегося механизма.

Механизм отталкивания от опоры

Отталкивание от опоры выполняется путем:

1. собственного отталкивания от опоры ногами (или ногами) и
2. маховых движений свободными конечностями и другими звеньями.

Эти движения тесно взаимосвязаны в едином двигательном действии – отталкивании от опоры. Основное уравнение, которое реализуется при этом – равенство действия и противодействия (III Закон Ньютона – $F = -F$). В случае отталкивания от опоры вес биозвеньев тела и сила инерции ускоряемых частей тела (динамический вес) действуют в направлении опоры (рис. 40). В свою очередь, со стороны опоры, в противоположном направлении, действует сила реакции опоры (R).

Для дальнейшего понимания механизма отталкивания от опоры необходимо напомнить о том, что движение тела совершается только за счет работы внешних сил (относительно тела). Если работа внешних и внутренних сил уравновешены, то тело находится в состоянии покоя. Для придания ему ускорения необходимо, чтобы рабочие силы (или их моменты) превышали эффект тормозящих сил (сил сопротивления). В случае отталкивания от опоры *рабочими силами* являются:

- силы мышечных тяг,
- сила инерции (маховые движения свободных звеньев тела).

Тормозящие силы:

- вес звеньев тела;
- сила инерции при их ускорении.

Силы мышечных тяг толчковой ноги выпрямляют ее. Поскольку стопа фиксирована на опоре, голень и бедро передают ускоряющее воздей-

ствие отталкивания через таз остальным звеньям тела, и возникает его ускорение в направлении отталкивания. Чтобы ОЦМ тела изменил движение, необходимо (в соответствии с законом сохранения движения ЦМ системы) наличие внешней силы, приложенной к системе. Реакция опоры R при отталкивании как раз и является такой необходимой внешней силой.

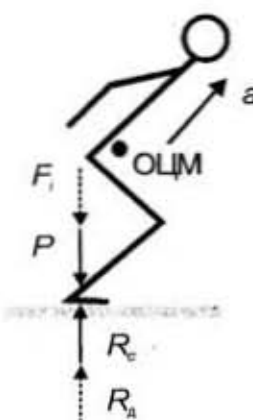


Рис. 40. Силы, действующие на тело человека во время отталкивания от опоры. Статический вес тела (P) уравновешивается силой реакции опоры статической (R_c). При возникновении ускорения биозвеньев тела (a), направленного от опоры, в направлении опоры действует сила инерции. Она суммируется со статической реакцией опоры и служит внешней силой для отталкивания тела от опоры

При рассмотрении тела человека как системы подвижных биозвеньев, можно видеть, что мышцы крепятся на одном звене биопары, а другим концом фиксированы на другом. Таким образом, сила мышечной тяги для каждого ускоряемого звена, является необходимой внешней силой.

Таким образом, на тело при ходьбе или беге действуют сила тяжести, сила реакции опоры, сила инерции ускоряемых звеньев и сила сопротивления воздуха.

Кроме движения опорных звеньев тела в беге и ходьбе принимают участие и маховые звенья тела. Маховые движения при отталкивании от опоры представляют собой быстрые контрлатеральные движения свободных (незамкнутых на опору) звеньев тела в направлении, совпадающем с отталкиванием опорной ноги.

Маховые движения при отталкивании обеспечивают:

- перемещение ЦМ свободных звеньев в направлении отталкивания (при этом происходит и ускорение ОЦМ тела);
- растяжение мышц антагонистов в фазе торможения, что обеспечивает удлинение времени действия силы тяги (здесь реализуется импульс силы – $S = F \cdot t$).

Большой импульс дает выраженный прирост количества движения и большую скорость всей

системы (тела человека).

Таким образом, в фазе разгона с нарастающим скоростью маховых звеньев растет и скорость ОЦМ тела человека. Следовательно, чем выше скорость маховых звеньев, тем она больше сказывается на скорости ОЦМ тела.

В фазе торможения маховых звеньев (вектор ускорения направлен к опоре) возникает сила инерции, которая направлена против ускорения звеньев, то есть от опоры и, слагаясь с силой тяги мышц, способствует ускоренному отталкиванию от опоры.

Рекуперация энергии при выполнении локомоций

Основным вариантом рекуперации энергии при выполнении шагательных движений является использование энергии упругой деформации, накопленной в мышцах в предыдущих фазах двигательного действия. При упругой деформации мышц, их растягивании приложенными силами, кинетическая энергия заторможенных звеньев переходит в потенциальную энергию упруго деформированных мышц и сухожилий.

В том случае, когда кинетическая энергия больше, то накапливается и используется большая величина упругой энергии.

Биомеханические основы бега

Бег является ускоренной формой передвижения, которая характеризуется кратким подбрасыванием тела над опорой поочередно каждой ногой (Ч. Диллман).

Согласно кинематической структуре, цикл бегового шага имеет период опоры и период переноса. Их соотношение определяет ритм бега. Как правило, опорный период в два раза короче переносного. На опоре реализуются две фазы: амортизация и отталкивание. В кинематическом плане их разграничивают по величине суставных углов опорной ноги (степень сгибания в коленном суставе и активность голенистопа). Период переноса состоит из четырех фаз: подъем, разгон, торможение и опускание.

Скорость, длина и частота шагов в беге

Скорость в шагательных движениях пропорциональна длине одиночного шага (L) и частоте их выполнения (T – темп). Следовательно, можно написать кинематическое уравнение любой локомоции шагательного типа:

$$V = L \cdot T$$

У лучших бегунов-спринтеров длина одиночного шага составляет 210-220 см, а у стайеров – лишь немного меньше – 205 см. Что касается тем-

па движений, то здесь различия более выражены: 4,3 шага/с – в спринте и 2,8 шага/с – у спортсменов-стайеров. Как правило, увеличение скорости передвижения в беге зависит от обеих переменных (длины шага и их частоты). Однако, рост скорости бега после величины примерно 6 м/с, происходит в основном за счет прироста темпа (рис. 41).

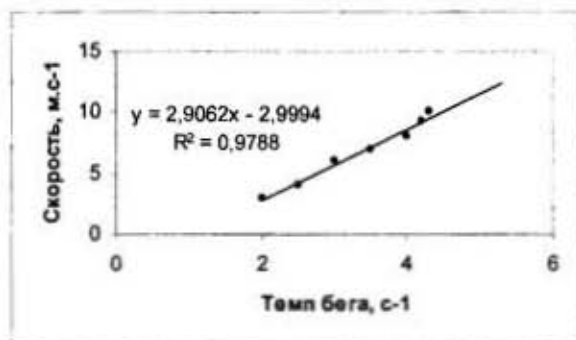


Рис. 41. Зависимость скорости бега от темпа беговых шагов. Взаимосвязь хорошо описывается линейным уравнением регрессии вида:

$y = 2,9062x - 2,9994$; достоверность связи составляет $R^2 = 0,979$

Оптимизация кинематических параметров является важной задачей при совершенствовании техники этого вида локомоций.

Скорость шагательных движений зависит от длины дистанции и подготовленности данного спортсмена. Этой величине скорости соответствуют оптимальные величины длины и частоты шагов. Они имеют индивидуальный характер, поскольку во многом зависят от пропорций тела.

Соотношение длительности разных частей бегового шага (ритм шагов) является результатом точного дозирования мышечных усилий: их своевременности, длительности, величины, а также быстроты их изменения. Наиболее четко определяемые показатели ритма – это соотношения длительности «опорного периода – переноса», «амортизации – отталкивание» (рис. 42).

Различные показатели ритма шагов раскрывают распределение усилий, позволяют выявить согласование усилий и самих движений, искать и находить оптимальные ритмы. Анализ показывает, что соотношение длительности периодов опоры и полета в беге составляет в среднем 1:2. Таким образом, время опоры почти в 2 раза короче времени полета.

В свою очередь каждый период бегового шага включает отдельные фазы. Так на опоре выделяют фазу амортизации и отталкивания. При беге с высокой скоростью фаза амортизации короче, что связано с более жесткой постановкой стопы на опору. В этом случае создаются лучшие условия для накопления энергии упругой деформации (с последующим ее использованием в фазе отталкивания).

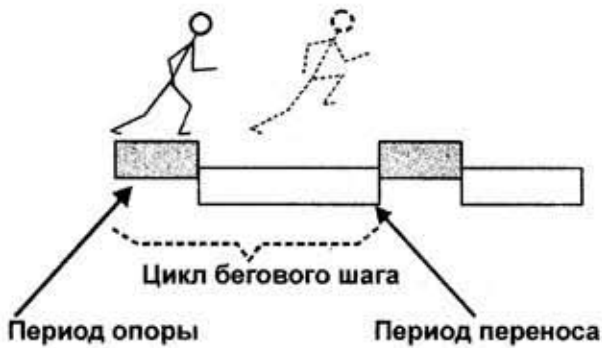


Рис. 42. Пример ритмограммы бегового шага, как соотношение периодов переноса и опоры

Таким образом, можно заключить, что с увеличением дистанции длительность опорного периода в основном изменяется за счет фазы амортизации. Если рассматривать эффективность индивидуальной техники бега, то можно выяснить, что ее совершенствование проявляется в укорочении фазы амортизации. Данный эффект способствует уменьшению потерь энергии упругой деформации (уменьшение релаксации) в опорной ноге.

Заданная скорость в ходьбе или беге может быть достигнута при различном сочетании длины и частоты шагов. Соответствующий график называется изоспидой; во всех точках этой кривой скорость одна и та же (рис. 43).

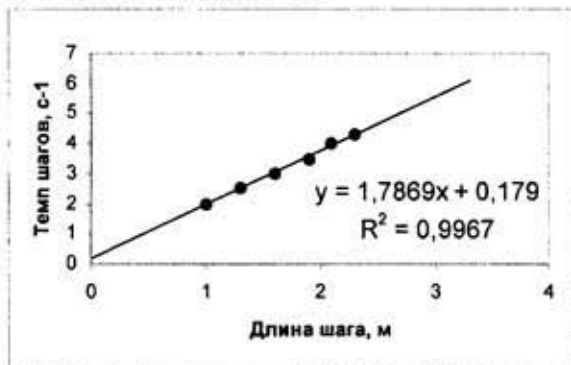


Рис. 43. Соотношение длины (горизонтальная ось) и частоты (вертикальная ось, темп) шагов в беге

Однако необходимо заметить, что энергетические затраты при разных сочетаниях длины и частоты шагов неодинаковы. При слишком коротких или очень длинных шагах (что соответствует недостаточной или чрезмерной силе отталкивания) энергозатраты на 1 м пути выше, чем при оптимальном (наиболее экономичном) сочетании длины и частоты шагов. Например, отклонение от оптимальной длины шага на 5% длины ноги при беге со скоростью 3,8 м/с увеличивает потребление кислорода в среднем на 0,2 мл/мин. кг (что составляет около 1 Дж на 1 м пути). Надо полагать, что это довольно большие затраты энергии.

Чтобы ответить на вопрос, почему от длины и частоты шагов зависит экономичность движе-

ний, нужно вспомнить, из каких составных частей складывается суммарная работа всех мышц. Слагаемыми работы мышц являются:

1. горизонтальная внешняя работа, или работа по изменению кинетической энергии тела в горизонтальном направлении (включая работу по преодолению внешних контактных сил – силы трения, силы сопротивления воздуха или воды);
2. вертикальная внешняя работа, или работа по изменению кинетической и потенциальной энергии тела в вертикальном направлении;
3. внутренняя работа, то есть работа по перемещению звеньев тела относительно ОЦМ (до 25% всех энергозатрат при беге);
4. работа внутренних органов (сердца, дыхательной мускулатуры и т. п.).

При беге, ходьбе, плавании и других циклических локомоциях полезной работой можно назвать только горизонтальную внешнюю работу. Остальные составляющие суммарной работы мышц сопряжены с непроизводительными затратами энергии. Чем они будут меньше, тем экономичнее движения (экономичность движений в самом общем виде оценивается отношением полезной работы к затраченной энергии).

Важное значение для экономизации бега или ходьбы имеют: устранение или уменьшение лишних движений; ненужных сокращений мышц и вертикальных колебаний тела.

Их постепенное устранение отчетливо наблюдается у детей в процессе роста и овладения ими двигательными навыками. То же самое наблюдается и при спортивной тренировке. Лишние движения, мало заметные при простом зрительном контроле, становятся явными при регистрации электрической активности мышц. Они проявляются в активизации мышц, не участвующих в выполнении данного движения. Например, при обучении гимнастическим упражнениям регистрируется высокая электрическая активность даже жевательных мышц.

Размах вертикальных колебаний тела (примерно 6-14 см) относится к непроизводительным движениям, которым редко придают значение, поскольку каждое из них в отдельности требует немного усилий. Однако расчеты показывают, что суммарная вертикальная работа при беге или при ходьбе весьма велика. Например, чтобы пробежать 3000 м неподготовленный человек сделает примерно три тысячи шагов. Умножив это число на высоту подъема в каждом шаге (например, 8-10 см), можно получить суммарную высоту подъема тела на высоту около 250 м, что соответствует высоте здания порядка 80 этажей.

Важным резервом экономичности движений является рекуперация энергии. Одно из проявлений

рекуперации основано на упругих свойствах мышц и сухожилий. Энергия упругой деформации, накопленная в уступающей фазе движения при выполнении отрицательной работы (при растягивании мышц), используется затем при сокращении мышц. Тем самым уменьшаются метаболические энергозатраты, и повышается экономичность движений.

С механизмом рекуперации энергии связывают полученные в ряде исследований высокие значения коэффициента механической эффективности, равные 40-60% у человека и достигающие 76% у кенгуру. Эти цифры привлекают внимание в связи с тем, что максимальная эффективность мышечного сокращения не превышает 30%. Более того, считается, что при значении коэффициента общей механической эффективности больше 25% всегда используется энергия упругой деформации растянутых мышц.

Биомеханические основы ходьбы

Ходьба, как и бег, являются «фундаментальными» движениями человека. Анализ техники движений в ходьбе часто используется для изучения общих закономерностей циклических локомоций. Вместе с тем ходьба, как и скользящий шаг на лыжах и коньках, отличаются от прыжка и бега тем, что не имеет периодов полета. Так как время опоры каждой ноги короче, чем время переноса, в каждом шаге возникает период двойной опоры. В спортивной ходьбе при более высокой скорости передвижения, чем в обычной ходьбе, период двойной опоры сокращен до минимума. С повышением частоты шагов спортивная ходьба может переходить в бег – двойная опора сменяется полетом. После того как стопа толчковой ноги отрывается от опоры, опора осуществляется только на другую, ранее перенесенную ногу. В этом случае бывшая толчковая нога становится переносной и выносится вперед. До момента, пока носки стоп не поравняются, происходит задний шаг. Это можно обозначить как фаза I, при этом тело спортсмена продвигается вперед к стоящей ноге. Общий центр массы тела перемещается вперед по инерции, хотя возможно и некоторое его «подтягивание» за счет разгибания бедра опорной ноги и выносом переносной ноги вперед. Переносная нога, после того как носки стоп поравнялись (по горизонтали), выносится далее вперед к новому месту опоры. Это движение обозначается как передний шаг (фаза II).

При его завершении продолжается активное разгибание бедра опорной (толчковой) ноги в тазобедренном суставе, за счет этого осуществляется наиболее энергичное продвижение тела вперед. Если взять для анализа вариант спортивной ходьбы, то здесь переносная нога ставится на опору и остается в течение всего времени опоры разогнутой или слегка согнутой в коленном суставе. Поэтому коленный сустав в отталкивании не участвует.

Отталкивание от опоры выполняется за счет подошвенного сгибания стопы и поворота таза вперед в тазобедренном суставе опорной ноги. Далее осуществляется одиночная опора, которая сменяется постановкой стопы переносной ноги на опору (происходит реализация двойной опоры). Затем начинается отрыв стопы толчковой ноги от опоры (фаза III). С началом опоры на другую опорную ногу происходит амортизация, торможение тела при движении его к опоре. Постепенное торможение осуществляется вследствие уступающей работы мышц-разгибателей стопы (опускание носка на опору) и мышц, отводящих таз в тазобедренном суставе этой ноги (опускание таза вниз). Амортизация с торможением по вертикали неминуемо сопровождается и некоторым торможением по горизонтали.

Что касается маховых движений рук при ходьбе, то они обе совершают уравнивающие движения с большим размахом, сопровождая повороты верхней части туловища навстречу поворотам таза.

Поскольку основным динамическим уравнением наземных локомоций является уравнение третьего закона Ньютона ($F = -F$), то силы действия ног на опору отображают всю совокупность внутренних и внешних сил, действующих на тело человека. Покрытие беговой дорожки и материал, из которого изготовлена обувь, тоже могут сказываться на величине силы действия на опору. Разница в величине вертикальной составляющей опорной реакции при ходьбе в обуви с жесткой подошвой и подошвой из эластичного материала может достигать 350 Н.

Упруго-эластичное покрытие дорожки и обувь, обладающая амортизационными свойствами, делают технику ходьбы и бега в большей степени соответствующей критерию комфортабельности. Тем самым уменьшается механическая нагрузка на суставы и особенно на межпозвоночные диски. Как известно, эти нагрузки, многократно повторяющиеся, весьма вредны для здоровья человека. И не случайно те, кто бегают трусцой по асфальту и в жесткой обуви, часто жалуются на боли в пояснице и суставах ног.

В качестве профилактики можно использовать упругие стельки, вложенные в обувь. Толщина стелек или прокладок под каблук должна быть около 10 мм. Материалом может служить войлок или упругий и гигроскопичный сорт поролон. Вместо стелек можно (порой даже лучше) ограничиться прокладкой такой же толщины под пятку стопы. Следует заметить, что современная спортивная обувь (кроссовки) соответствуют биомеханическим критериям комфортабельности.

Энергетика ходьбы и бега

При ходьбе и беге человек затрачивает энергию не только на горизонтальные, но на вертикаль-

ные и поперечные движения общего центра масс. В зависимости от фазы цикла движений, величина кинетической и потенциальной энергии тела изменяется. Характер этих изменений в ходьбе и беге принципиально различен. Кинетическая и потенциальная энергия в ходьбе изменяются в противофазе; например, в момент постановки ноги на опору максимум кинетической энергии совпадает с минимумом потенциальной, а в беге – синфазно (например, в высшей точке полета максимум кинетической энергии, совпадает с максимумом потенциальной). Следовательно, при ходьбе происходит особый вид рекуперации энергии. Здесь осуществляется переход части кинетической энергии в потенциальную энергию гравитации и обратно, а при беге этот вид рекуперации практически отсутствует. Зато при беге значительно более выражен другой вид рекуперации, когда кинетическая энергия

переходит в потенциальную энергию сокращающихся мышц, действующих подобно пружине.

Как правило, энергозатраты на 1 м пути при ходьбе меньше, чем при беге. При высоких скоростях ходьбы и бега, с сопоставимой скоростью, наоборот, бег экономичнее ходьбы. Зона, где более выгоден бег, отделена от зоны, где энергетически эффективней ходьба. Она называется граничной скоростью. Величина последней определяется числом Фруда (Φ), которое можно вычислить как:

$$\Phi = V^2/h \cdot g,$$

где g – ускорение земного тяготения ($\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$), V – скорость передвижения человека ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$), h – высота ОЦМ над опорой в основной стойке (м). Если число Фруда меньше единицы ($\Phi < 1$), то энергетически более выгодна ходьба, а при $\Phi > 1$ выгоднее бег.

Резюме

Основой наземных локомоций шагательного типа является отталкивание от опоры. Для отталкивания от опоры необходимо наличие внешней силы. Такой силой является сила реакции опоры. По физической сущности она представляет собой разновидность силы упругой деформации.

Разгон опорных звеньев ноги в направлении от опоры, создает силу инерции направленную к опоре. Здесь она суммируется со статической силой реакции опоры, и тем самым создается избыточное давление, которое, будучи переданным по опорной ноге к центру массы системы, ускоряет его в направлении отталкивания.

Правильно организованное действие маховых звеньев дополняет эту позитивную работу по ускорению ОЦМ системы.

Движения в шагательных локомоциях выполняются циклами, которые состоят из периодов, а те, в свою очередь, – из отдельных фаз (фаза – наименьшая временная часть системы движения, в течение которой полностью решается элементарная двигательная задача). Повторение циклов создает темп движения или его частоту (темп – частное от деления числа движений на единицу времени). Путь, пройденный телом за один цикл (в шагательных локомоциях), называется шагом (измеряется в метрах). Произведение длины шага (L , м) на темп движений (T , с^{-1}) дает в результате горизонтальную скорость циклических локомоций (V , $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$). На основе анализа зависимости скорости передвижения от темпа и длины шага, может быть найдено их оптимальное соотношение, при котором скорость будет максимальной в данных условиях.

Вопросы для повторения и закрепления материала главы

1. Каковы различия в кинематике ходьбы и бега?
2. Каков механизм отталкивания от опоры при ходьбе и беге.
3. Роль маховых движений при отталкивании от опоры?
4. Какие внешние силы действуют на человека при ходьбе и беге?
5. Каков характер изменений кинетической и потенциальной энергии при ходьбе и беге?
6. Какие разновидности рекуперации энергии наблюдаются при ходьбе и беге?
7. Что такое ритм циклических локомоций?
8. Граничные скорости ходьбы и бега. Число Фруда.
9. Что такое оптимальная скорость и оптимальное соотношение длины и частоты шагов (темпа)?

Глава 10. Биомеханика перемещающих действий

Перемещающие (переместительные) действия (прыжки, удары и метания) весьма многообразны. Состязания в прыжках и метаниях были всегда популярны, поскольку имели большое прикладное значение.

В целом, перемещающие движения в спорте разнообразны и примерами могут служить метания и удары по мячу, а также броски партнера в акробатике и противника в борьбе, подъем штанги и т. д.

В перемещающих движениях в спортивной практике обычно решаются следующие общие задачи:

- достичь максимальной силы действия (подъем штанги),
- максимальной скорости перемещаемого тела (в метаниях),
- наибольшей точности (штрафные броски в баскетболе).

В практике часто требования к переместительным действиям предъявляются совместно (например, скорости и точности двигательного действия).

Что касается классификации, то среди переместительных действий выделяют движения:

- с разгоном перемещаемых тел (например, метание гранаты),
- с ударным взаимодействием (например, удары в хоккее, теннисе или в футболе).

Так как в большинстве случаев, связанных с переместительными действиями происходит сообщение скорости вылета какому-нибудь телу, то в первую очередь необходимо рассмотреть механические основы полета спортивных снарядов.

Кинематика метания

Траектория (L , дальность полета) полета снаряда определяется, исходя из уравнения вида: $L = V^2 \cdot \sin 2\alpha / g$ (рис. 44):

- величиной начальной скорости (V),
- углом вылета (угол α),
- высотой выпуска снаряда,
- вращением его (мяч, диск),
- сопротивлением воздуха.

Начальная скорость вылета является основной характеристикой, поскольку с ростом спортивного мастерства увеличивается скорость движения концевой звена биоцепи, выполняющей метательное движение и, следовательно, прирост результата в метаниях и бросках будет находиться в квадратичной зависимости. Например, увеличение скорости выпуска снаряда в 1,3

раза будет способствовать приросту результата на 169% (более чем в полтора раза). Так если метать ядро со скоростью $10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, то можно достигнуть результата в 12 м, а прирост скорости $15 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ будет соответствовать результату около 25 м.



Рис. 44. Траектория полета спортивного снаряда. Двойной стрелкой отмечен угол вылета как угол между горизонталью и вектором скорости (V)

Углы вылета спортивных снарядов

В практике, при биомеханическом анализе, выделяют следующие основные углы вылета:

1. Угол места – угол между горизонталью и вектором скорости вылета. Этот угол определяет движение снаряда в вертикальной плоскости: выше – ниже.
2. Азимут – угол вылета в горизонтальной плоскости (правее – левее, измеряется от условно выбранного направления отсчета).
3. Угол атаки – угол между вектором скорости вылета и продольной осью снаряда. Понятие этого угла характерно для анализа техники метания копья и в некоторой степени – диска.

Высота выпуска снаряда

Дальность полета снаряда при метаниях увеличивается примерно на столько, на сколько увеличивается высота его выпуска (рис. 45). Принято считать, что каждые 5 см увеличения высоты выпуска снаряда, приводят к приросту результата в метаниях на 5%.

При кинематическом анализе метаний выделяют несколько фаз:

1. *Разбег со снарядом.* Цель – придать телу возможно большую скорость. К этой скорости добавляется скорость броскового движения руки.
2. *Подготовка к броску.* В метаниях гра-

наты, мяча и колья в этой фазе тело отклонено в сторону, противоположную метанию.

3. *Бросок.* Он начинается, как правило, с разгибания правой ноги, затем происходит сгибание и поворот туловища вперед и, наконец, рывок рукой.
4. *Остановка после броска.* Имеет целью затормозить продвижение вперед, что достигается переступанием правой ноги перед левой.

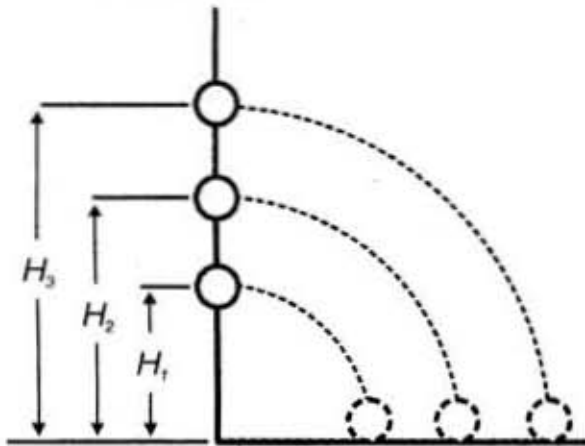


Рис. 45. Зависимость дальности полета спортивного снаряда от высоты выпуска

Если рассмотреть работу мышц на примере броска мяча или гранаты, то можно выделить основные мышечные группы, участвующие в метании. Сегменты метаемой руки вовлекаются в процесс метания, начиная с проксимального – плеча. Затем активируется предплечье, кисть и пальцы. Последними включаются в работу мышцы дистальных звеньев кисти метаемой руки. Непосредственно перед броском, тело метателя превращается как бы в натянутый лук. Ведущими мышцами при выполнении броска являются: мышцы живота; пояса верхних конечностей; большая грудная мышца, широчайшая мышца спины; мышцы участвующие в разгибании локтевого сустава, сгибатели кисти и пальцев.

Характеристика оптимальных режимов метания спортивных снарядов

Из биомеханического анализа на основе уравнения длины траектории видно, что эффективность бросков и метаний зависит в основном от двух переменных – скорости выпуска снаряда и оптимального угла вылета. В связи с этим возникает вопрос, какая же скорость будет оптимальной? Ответ на вопрос об оптимальной скорости можно найти из вышеприведенной формулы, определяющей длину траектории при метаниях. Там мы видим, что возникает квадратичная за-

висимость результата броска или метания от скорости выпуска снаряда.

Таким образом, необходимо понять то, как спортсмен должен организовать свои движения, чтобы скорость вылета снаряда была максимальной, и какие двигательные действия используются спортсменом для сообщения максимальной скорости снаряду. К сожалению, на эти вопросы можно дать только приблизительные ответы. Причина состоит в том, что пока нет исчерпывающих экспериментальных данных по технике большинства спортивных метаний. Ни одному исследователю пока еще не удалось получить математическую функциональную зависимость скорости вылета спортивного снаряда во времени, как это сделано, например, для спринтерского бега.

Процесс передачи скорости снаряду в большинстве метаний можно разделить на два этапа. На первом этапе сообщается скорость всей системе «метатель – снаряд», вследствие чего она приобретает определенное количество движения (запас кинетической энергии, который измеряется произведением массы на скорость – mV). На втором этапе за счет тормозящего действия ног происходит последовательное торможение звеньев тела снизу вверх. Это приводит к уменьшению движущейся массы тела спортсмена и как следствие – к увеличению скорости вышерасположенных звеньев тела, вплоть до кисти и спортивного снаряда.

Иными словами, происходит перераспределение количества движения между звеньями тела. То есть при сохранении количества движения, уменьшение массы приводит к пропорциональному нарастанию скорости движения. Второй механизм, обеспечивающий нарастание скорости метаемого снаряда, основан на использовании энергии упругой деформации мышц. Известно, что мышца наряду со способностью сокращаться при ее возбуждении со стороны ЦНС обладает рядом весьма важных механических свойств. Среди них особое значение имеет упругость, которая проявляется в возникновении силы тяги на концах мышцы в ответ на ее пассивное сжатие или растягивание. Зависимость между силой тяги мышцы и ее длиной имеет нелинейный характер. Многочисленные эксперименты на изолированных мышцах животных и человека показали, что предварительно растянутая мышца при последующем сокращении проявляет большую силу тяги.

В спортивных метаниях предварительное натяжение мышц создается так называемым обгоном звеньев. Подобное движение выполняется следующим образом. Проксимальный сустав звена ускоренно выдвигается в направлении метания. Поскольку звено имеет определенную массу, то есть обладает инерционными свойствами, его дистальный конец отстает в своем дви-

жении. Вследствие этого происходит растягивание мышц, обслуживающих данный сустав. В результате в них накапливается потенциальная энергия упругой деформации, которая при последующем сокращении мышц переходит в кинетическую энергию движущего ею звена, увеличивая скорость его движения.

Растягивание мышц в процессе выполнения метаний и бросков может вызвать действие еще одного механизма. Так, при растягивании мышцы происходит возбуждение расположенных в ней рецепторов, что может привести к рефлекторному усилению нервной импульсации, приходящей к мышце (так называемый стреч-рефлекс; Р. Эккерт и др., 1991).

В настоящее время трудно сказать, какой из названных механизмов в большей мере используется при организации движений при метаниях. Несомненно одно: понимание этих механизмов может расширить представление о рациональных способах техники спортивных метаний и путях ее дальнейшего совершенствования.

Таким образом, дальность полета снаряда при бросках и метаниях при оптимальном угле вылета определяется в основном скоростью вылета. Поэтому следует организовывать двигательные действия так, чтобы максимально увеличить скорость вылета снаряда.

При необходимости достижения в метаниях и бросках не только дальности, но и высокой точности, необходимо помнить, что чем больше дальность полета снаряда, тем ниже точность и наоборот. Так, при броске по кольцу в баскетболе точность попадания составляет 40-80% с дистанции 1 м и только 10-20% с дистанции 7 м. Предполагают, что если человек обладает точностью в одном виде метаний, то он будет обладать ею и в других видах. При обучении метательным движениям на точность необходимо учитывать существование сенситивного периода (от 12 до 14 лет), когда процесс обучения наиболее плодотворен. В этом возрастном периоде происходит быстрое естественное развитие точности в прицельных метаниях.

Ударные движения

В механике встречаются движения, при которых за очень короткий промежуток времени, то есть почти мгновенно скорости контактирующих тел резко изменяются. Длительность удара составляет обычно десятые или меньшие части секунды. Этот тип движений называют ударными или просто ударами. Встречаются различные по характеру случаи ударных явлений. В простейшем виде удар проявляется как почти мгновенное наложение или снятие связей, например, при ковке металла или отрыве сосульки, висевшей на карнизе крыши здания. Примерами ударов в

спортивной практике могут служить:

- удары по мячу без искусственных приспособлений (техника игры в футбол или волейбол);
- удары по мячу или шайбе с помощью приспособлений (клюшки, ракетки в хоккее и теннисе);
- приземление после прыжков и соскоков (в том числе и контакт с опорой во время спринтерского бега) и т. д.

Характер изменения сил при ударном взаимодействии можно проиллюстрировать (рис. 46). Сначала силы быстро возрастают до наивысшего значения, а затем падают до нулевой величины. Максимум силы может быть очень велик. При этом мерой ударного взаимодействия тел является не столько сама сила, а создаваемый ею ударный импульс. Он численно равен площади под кривой изменения силы во времени и обычно рассчитывается как интеграл:

$$S = \int F dt$$

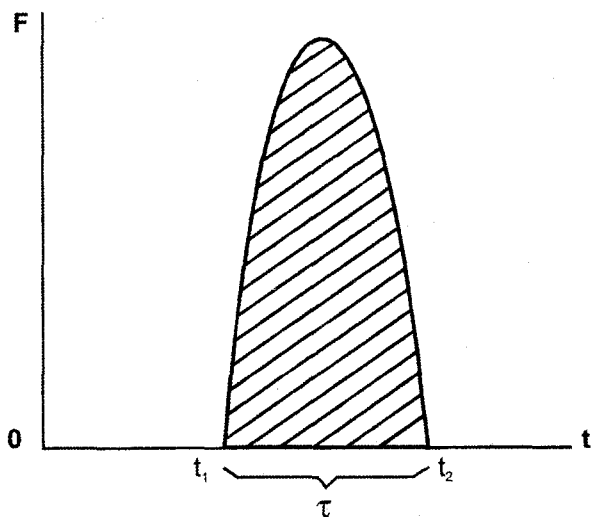


Рис. 46. Изменение силы, действующей при ударе, где τ — ударный импульс, \int — знак интегрирования, t_1 и t_2 — время начала и конца удара, $F(t)$ — зависимость ударной силы F от времени ее действия t

Скорость тела за время удара изменяется на определенную, чаще всего значительную величину. Это изменение прямо пропорционально ударному импульсу и обратно пропорционально массе тела. Другими словами, ударный импульс равен изменению количества движения тела (mV). Следовательно, задача ударного движения заключается в передаче энергии ударяемому телу. Изменение скоростей точек при ударе на конечные величины связано с большими ударными ускорениями этих точек, возникновение

которых требует больших ударных сил. Если F – ударная сила и t – длительность, или время удара, то характерный график изменения ударной силы за время удара от момента t_1 до момента t_2 имеет вид, показанный на рис. 46.

При ударе двух тел в месте их соприкосновения возникают деформации и, следовательно, перемещение точек, обусловленное деформациями. Вследствие незначительности деформаций, по сравнению с перемещениями точек тел за конечный промежуток времени, перемещения точек в пределах самого тела за время удара являются величинами малыми. Поэтому перемещения точек за время удара можно пренебречь.

Удар называют прямым, если скорость точки V перед ударом направлена по нормали к поверхности в точке удара M (рис. 47). После удара материальная точка отделится от поверхности, имея в общем случае скорости U , направленную тоже по нормали к поверхности.

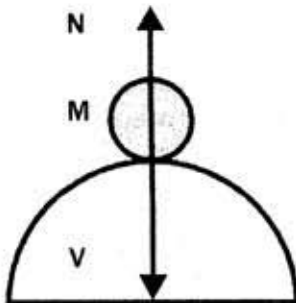


Рис. 47. Прямой удар (описание в тексте)

Для оценки ударных свойств поверхности и тела, принимаемого за материальную точку, вводится коэффициент восстановления k . Коэффициентом восстановления называют отношение числового значения скорости точки после удара к числовому значению ее до удара, то есть

$$k = U/V \text{ (рис. 47),}$$

где V – скорость точки до удара, U – ее скорость после удара.

Если $k = 1$, то удар называется абсолютно упругим. В этом случае $U = V$ и при ударе точки изменяют только направление скорости на противоположное. При $k = 0$ удар считается абсолютно неупругим. В случаях, при которых $0 < k < 1$, удар называется просто упругим (или частично упругим).

Таким образом, упругий удар можно характеризовать коэффициентом восстановления. Он равен отношению скоростей взаимодействующих тел после и до удара. Его также можно косвенно оценить таким способом: сбросить мяч на жесткую горизонтальную поверхность, измерить высоту падения мяча и высоту, на которую он отскакивает.

Коэффициент восстановления зависит от упругих свойств соударяемых тел. При абсолютно упругом ударе форма тела восстанавливается полностью. В случае абсолютно неупругого удара форма тела совсем не восстанавливается, так как удар имеет только одну фазу деформации (нет фазы

восстановления как при упругом ударе).

На точки тела при прямом ударе о неподвижную поверхность со стороны поверхности действует ударная сила реакции поверхности N . Она изменяется по величине в течение удара, но все время направлена по нормали к поверхности.

В зависимости от направления движения мяча до удара различают прямой и косой удары. В зависимости от направления ударного импульса – центральный и касательный удары. При прямом ударе направление полета мяча до удара перпендикулярно к плоскости ударяющего тела или преграды. Пример: падение мяча сверху на горизонтальную поверхность. В этом случае мяч, после отскока летит в обратном направлении.

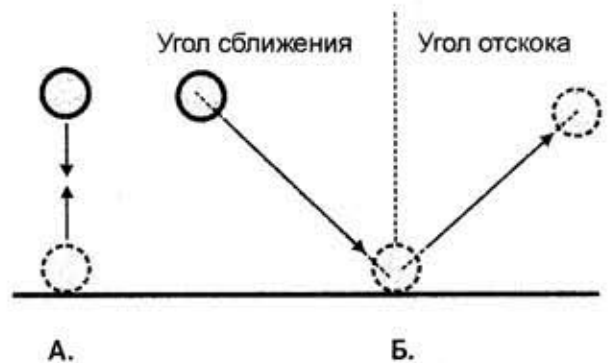


Рис. 48. Различные варианты отскока мяча от неподвижной поверхности: А. – прямой (или центральный) удар; Б. – касательный удар

При косом ударе угол сближения (рис. 48) отличен от нуля. При идеальном упругом ударе углы сближения и отскока равны. При реальных (не вполне упругих) ударах угол отскока больше угла сближения, а скорость после отскока от неподвижной преграды меньше, чем до удара. Центральный удар характеризуется тем, что ударный импульс проходит через ЦМ мяча. В этом случае мяч летит не вращаясь. При касательном ударе ударный импульс не проходит через ЦМ мяча – мяч после такого удара летит с вращением.

Скорость после удара будет тем больше, чем больше скорость и масса ударяющего тела (ударная масса). Это легко понять из анализа уравнения, описывающего сохранение количества движения (mV):

$$m_1 V_1 = m_2 V_2$$

где m_1 – масса первого тела (ударяющего), V_1 – его скорость; m_2 – масса ударяемого тела (например, футбольный мяч или шайба), V_2 – его скорость.

Преобразуем уравнение в следующее:

$$V_2 = m_1 V_1 / m_2$$

Скорость движения (и, следовательно, запас кинетической энергии) ударяемого тела пропорциональна массе и скорости ударяющего тела и обратно пропорциональна массе ударяемого.

В специальных случаях (нецентральный и не вполне упругий удар) картина сложнее, однако и в них скорость после удара будет тем выше, чем больше ударная масса и скорость тела, наносящего удар.

Биомеханика ударных движений как элемент спортивной техники

Ударными в биомеханике называются действия, результат которых достигается механическим ударом. В ударных действиях различают:

1. **замах** – движение, предшествующее ударному движению и приводящее к увеличению расстояния между ударным звеном тела и предметом, по которому наносится удар; эта фаза наиболее вариативна;
2. **ударное движение** – от конца замаха до начала удара;
3. **ударное взаимодействие** (или собственно удар) – столкновение ударяющихся тел;
4. **послеударное движение** – движение ударного звена тела после прекращения контакта с предметом, по которому наносится удар.

Уже говорилось, что при механическом ударе скорость тела (например, мяча) после удара тем выше, чем больше скорость ударяющего звена непосредственно перед ударом. При ударах в спорте такая зависимость необязательна. Например, при подаче в теннисе увеличение скорости движения ракетки может привести к снижению скорости вылета мяча. Это можно сравнить с действием мышц человека при ударах. Если ударное звено во время удара дополнительно ускоряется за счет активности мышц, ударный импульс и соответственно скорость вылета снаряда увеличиваются; если оно произвольно тормозится, ударный импульс и скорость вылета уменьшаются, что бывает нужно при точных укороченных ударах, напри-

мер, при передачах мяча партнеру.

Некоторые ударные движения, когда дополнительный прирост количества движения во время соударения очень велик, вообще являются чем-то средним между метаниями и ударами (так иногда выполняют вторую передачу в волейболе).

Координация движений при максимально сильных ударах подчиняется двум требованиям:

1. сообщение наибольшей скорости ударяющему звену к моменту соприкосновения с ударяемым телом; в этой фазе движения используются те же способы увеличения скорости, что и в других перемещающих действиях;
2. увеличение ударной массы в момент удара. Это достигается «закреплением» отдельных звеньев ударяющего сегмента путем одновременного включения мышц-антагонистов и увеличения радиуса вращения. Например, в боксе и карате эффективность удара правой рукой увеличивается примерно вдвое, если ось вращения проходит вблизи левого плечевого сустава, по сравнению с ударами, при которых ось вращения совпадает с центральной продольной осью тела.

Время удара настолько кратковременно, что исправить допущенные ошибки уже невозможно. Поэтому точность удара в решающей мере обеспечивается правильными действиями при замахе и ударном движении. Например, в футболе место постановки опорной ноги определяет у начинающих целевую точность примерно на 60–80% (Г.А. Смирнов).

Кроме того, весьма эффективно использовать «вторичные» удары. При этом после нанесения удара (рукой или ногой) по ударяемой цели, спортсмен выполняет второе движение к цели с плотным контактом и максимальным изометрическим напряжением мышц всего тела.

Тактика спортивных игр нередко требует неожиданных для противника ударов («скрытых»). Это достигается выполнением ударов без подготовки (иногда даже без замаха), после обманных движений (финтов) и т. п. Биомеханические характеристики ударов при этом меняются, так как они выполняются в таких случаях обычно за счет действия лишь дистальных сегментов (кистевые удары).

Резюме

Перемещение спортивных снарядов, а также соперников и партнеров является важной двигательной задачей в ряде видов спорта. Эти движения объединяются в группу перемещающих действий. Основное динамическое уравнение этих движений – сохранение количества движения ($m_1V_1 = m_2V_2$), заключается в передаче энергии от одного тела к другому.

Динамической основой этих движений служит понятие кинетической энергии движущегося тела. Она зависит от массы тела и квадрата скорости (в случае вращательного движения – от момента инерции и квадрата угловой скорости) его движения.

Что касается кинематики движения, то она проявляется в оптимальных скоростях движения перемещаемых тел. В случае метаний и бросков это траектории близкие к баллистическим. Они хорошо прогнозируются на основе уравнения длины траектории, которая в этом случае зависит от квадрата начальной скорости движения тела и синуса угла вылета снаряда ($L = V^2 \cdot \sin 2\alpha / g$).

Управление движениями в перемещающих действиях основано на оптимизации масс взаимодействующих тел и скоростей их движения.

Вопросы для повторения и закрепления материала главы

1. Общая характеристика переместительных действий.
2. Кинематика метаний.
3. Динамика бросков и метаний.
4. Передача энергии в биокинематических цепях при осуществлении бросков и метаний.
5. Цель управления движениями при бросках и метаниях.
6. Анализ топографии основных работающих мышц при метаниях и бросках руками.
7. Основы теории ударов. Определения.
8. Кинематика ударных действий, фазы ударного движения.
9. Биодинамика ударов, виды ударных действий.
10. Особенности управления ударными действиями.

Глава 11. Биомеханические основы двигательных качеств

Для того чтобы понять сущность двигательных качеств человека, его выносливость, быстроту, гибкость, ловкость и силу, недостаточно регистрировать внешние показатели. Нужно постараться проникнуть в сущность физиологических и биохимических процессов, обеспечивающих каждое из этих двигательных качеств.

Биомеханические основы выносливости

В качестве иллюстрации к пониманию сущности этого двигательного качества можно рассмотреть бег. Вполне понятно, что чем больше расстояние, тем больше времени нужно на его преодоление. Это можно представить в виде линейной зависимости скорости бега как отношения пройденного пути (S) к затраченному времени (t). Построим график, связывающий дистанцию со временем ее пробегания (рис. 49). Соединим точки на графике и продолжим полученную линию влево до пересечения с вертикальной осью, отсекая от вертикальной оси отрезок a . Математическая запись этого графика выглядит так

$$\Delta S = a + bt,$$

где a – дистанция анаэробных резервов, показывающая, какое расстояние человек может пробежать за счет анаэробных (лактационный + гликолитический) источников энергии.

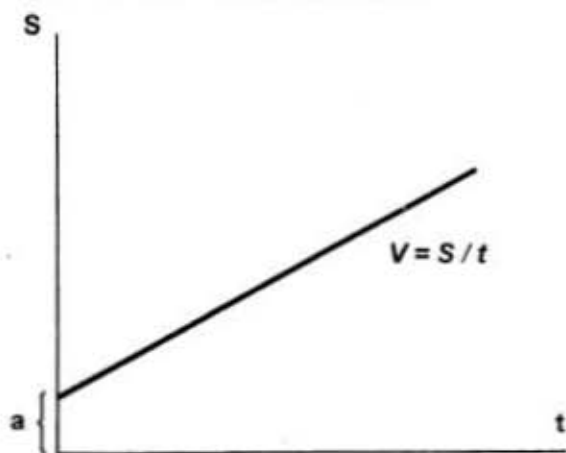


Рис. 49. Соотношение пройденного пути и затраченного времени. Метод расчета дистанции анаэробных резервов и критической скорости бега.

У взрослого, хорошо тренированного человека, это расстояние составляет (в среднем) 100–200 м или равняется 20–25 с интенсивного бега. Проявление этого двигательного качества нахо-

дится в сильной зависимости от емкости анаэробной энергетической емкости мышечных клеток. У ребенка дистанция анаэробных резервов значительно меньше; с возрастом и по мере повышения физической работоспособности она увеличивается.

Выносливость зависит не только от энергетического потенциала человека, но и от умения экономно расходовать запас энергии. Для того чтобы это важное положение лучше запомнилось, воспользуемся простыми примерами из жизни. Энергетический потенциал сравним с имеющейся в наличии суммой денег, а экономичность – с бережливостью. Здесь важно подчеркнуть: именно с бережливостью, а не со скупостью. Ибо значительные затраты порой необходимы, но их следует осуществлять рационально. Например, человек, который во время бега хаотично размахивает руками или совершает движения поперек беговой дорожки, тратит энергию неразумно.

В спорте высших достижений, где энергетические возможности спортсменов близки друг другу, экономичность важна в большей степени, чем энергетический потенциал. Так, из членов национальной сборной команды по бегу на длинные дистанции были отобраны 12 спортсменов с равным уровнем максимального потребления кислорода. У всех спортсменов в лабораторных условиях определяли потребление кислорода во время бега на тротуаре со скоростью 4,5 м/с.

Прежде чем перейти к рассмотрению путей экономизации движений и тем самым повышения выносливости, нужно уяснить, от чего зависит экономичность. Основными факторами экономичности являются интенсивность мышечной работы, техника двигательных действий и избранный тактический вариант. Для более подробного анализа проследим цепь преобразований метаболической энергии мышечного сокращения в полезный результат двигательной деятельности.

Как известно, любая форма активности живого организма обеспечивается энергией, запасенной в молекулах аденозинтрифосфата (АТФ). Но лишь около 20–25% энергии АТФ переходит в механическую энергию при мышечном сокращении. Остальные 75% энергетического запаса расходуются в основном на теплообразование.

Таким образом, по коэффициенту полезного действия мышцы не лучше машин, созданных человеком (известно, что КПД двигателя составляет у паровоза 5–8%, у автомобиля – 20–25%, у тепловоза – 40%, у электровоза – 60%).

Полная механическая энергия создается за счет механической работы, совершаемой всеми

без исключения мышцами тела. Ее удобно рассматривать как сумму явной, или наблюдаемой, механической работы и скрытой от нашего взгляда работы внутренних органов (сердца, дыхательной мускулатуры, а также мышц-антагонистов в тех случаях, когда их напряжение чрезмерно, нерационально).

Явная механическая работа состоит из внутренней и внешней. *Внутренней* называют работу, совершаемую при перемещении отдельных сегментов тела (в первую очередь рук и ног) относительно общего центра масс. Внешняя работа – это работа по перемещению всего тела, масса которого как бы сосредоточена в точке ОЦМ. На внутреннюю работу приходится значительная часть расходуемой энергии, например, на перемещение ног у велосипедиста затрачивается более половины явной механической работы. И, наконец, внешняя механическая работа состоит из продольной работы, за счет которой движущийся человек или спортивный снаряд перемещается в нужном направлении, и непроизводительной поперечной работы.

Теперь мы знаем, что полная механическая энергия человеческого тела состоит из фракций, часть из которых обеспечивает выполнение полезной работы, а другая часть бесполезна, непроизводительна и ее следует по возможности уменьшать. В соответствии с этим рекомендации, направленные на повышение выносливости, можно условно делить на пять групп.

Во-первых, рекомендуется избегать излишних, непроизводительных мышечных сокращений и напряжений. Тем самым уменьшается работа внутренних органов. Даже при выполнении тяжелой работы движения должны быть по возможности более свободными, не закрепощенными. Скованность движений вызывается излишней активностью мышц-антагонистов. К сожалению, она не всегда заметна со стороны, и потому педагог должен развивать у учеников умение контролировать свои движения, расслабляться. Не случайно во многих видах спорта (например, в плавании, горных лыжах и т. п.) умение расслаблять мышцы, которые в данный момент времени могут не участвовать в выполнении основного двигательного действия, является признаком высшего мастерства.

Во-вторых, следует уменьшать лишние, непроизводительные движения. Тем самым уменьшается внутренняя работа и работа в поперечном направлении.

В-третьих, целесообразно использовать рекуперацию энергии. Рекуперацией энергии можно объяснить высокую экономичность бега человека (КПД составляет около 40%) и прыжках кенгуру, где эффективность использования энергии достигает 75%. Сущность рекуперации заключается в том, что кинетическая энергия движущейся

тела при приземлении частично переходит в потенциальную энергию мышц нижних конечностей, которые в данном случае функционируют подобно пружинам. Чем сильнее сдавили пружину, тем мощнее она распрямляется. И потому значительная часть энергии, необходимой для следующего бегового шага или прыжка, запасается в «мышцах-пружинах» в конце предыдущего движения. Таким образом, однажды произведенная механическая энергия используется многократно. Но есть разница между рекуперацией энергии стальной пружины и в мышце. Запасенная в мышце потенциальная энергия очень быстро (в течение 1-5 с) переходит в тепло. Поэтому чем быстрее движение, выше скорость, стремительнее походка, тем больше рекуперированной энергии переходит в полную механическую энергию. Следовательно, поток рекуперированной энергии при высокой культуре движений может составлять значительную часть полной механической энергии и существенно повышать выносливость человека.

В-четвертых, рекомендуется выбирать оптимальную по экономичности интенсивность движений. Известно, что по мере увеличения интенсивности мышечной работы и механические, и метаболические энергозатраты растут не пропорционально интенсивности, а гораздо значительнее.

Перечислим основные причины этого явления:

1. увеличение тепловых потерь в результате нагревания тела;
2. увеличение энергозатрат на работу внутренних органов (в первую очередь, на усиленное функционирование сердца и сосудистой системы);
3. увеличение темпа движений и вызываемое этим повышение затрат энергии на внутреннюю работу, работу в поперечном направлении, а также на разгон и торможение звеньев тела;
4. увеличение сопротивления внешней среды, например, на преодоление сопротивления воздуха спринтер затрачивает до 16% всей метаболической энергии.

Из сказанного, казалось бы, следует, что увеличение интенсивности движений всегда сопровождается снижением экономичности. Но иной результат получается, если рассматривать не величину энергозатрат в единицу времени, а энергетическую стоимость единицы выполненной работы или единицы преодоленного расстояния (метра пути). Оказывается, в каждой конкретной ситуации существует оптимальная по экономичности интенсивность мышечной работы (например, скорость передвижения, при которой энергетические затраты на метр пути минимальны).

В-пятых, следует осуществлять оптимальные двигательные переключения.

К двигательным переключениям относятся:

- изменение интенсивности мышечной работы (например, скорости передвижения);
- изменение проявляемой в двигательном действии силы и скорости (например, длины и частоты шагов);
- переход с одного способа выполнения двигательного задания на другой (например, круговое – импульсное педалирование, смена типа ходьба – бег, одновременный – попеременный лыжный ход и т. д.).

В отличие от других рассмотренных способов повышения выносливости оптимальные двигательные переключения дают возможность не только экономично расходовать энергетический потенциал, но и наиболее полно его использовать. И то и другое необходимо для проявления присущей человеку выносливости. Вначале расскажем о двигательных переключениях, делающих двигательную деятельность наиболее экономичной, а затем о переключениях, максимизирующих механическую производительность.

Чем выше физическая работоспособность и комфортнее условия, тем выше наиболее экономичная скорость. Если человек хочет передвигаться с минимальными энергозатратами, он должен изменить («переключить») скорость в соответствии с меняющимися условиями и собственным состоянием. Например, повышение температуры воздуха от +20°C до +40°C снижает наиболее экономичную скорость бега на 20%. К такому же эффекту приводит груз, если его тяжесть составляет 15-20% от веса тела.

Возникает вопрос: как узнать, какая интенсивность движений в каждой конкретной ситуации является оптимальной? Точный ответ на этот вопрос получен лишь для некоторых видов двигательной деятельности и возрастных групп. Теоретической основой такой возможности служит принцип минимума энергозатрат, согласно которому психически нормальное живое существо произвольно организует свою двигательную деятельность так, чтобы свести к минимуму затраты энергии.

Человек как биологический вид формировался в непрерывной борьбе за экономию энергии и, в частности, научился самостоятельно находить наиболее экономичный двигательный режим. Известно, что вызывают выраженное утомление не только чрезмерно интенсивные движения, но и недостаточно энергичные, например, при ожидании в очереди или во время экскурсии, где энергозатраты хотя и невелики, но не оптимальны по экономичности, так как скорость передвижения ниже оптимальной.

В подобных случаях усталость наступает не только потому, что произведена определенная

работа, а в основном как расплата за нарушение принципа минимума энергозатрат.

К биомеханическим способам повышения выносливости необходимо приобщать человека еще в школьном возрасте. Поскольку исправить технику движений гораздо труднее, чем сформировать ее с самого начала правильно. Все несовершенства двигательной культуры могут быть исправлены только на основе знания и повседневного использования биомеханических закономерностей.

Итак, когда человек выполняет какое-либо достаточно длительное двигательное задание (например, ходьбу или бег), то всегда приходится иметь дело с тремя основными переменными, которые могут быть измерителями выносливости [Д.Д. Донской и В.М. Зациорский, 1979].

1. *Интенсивность двигательного задания* (имеется в виду: либо скорость, мощность или сила действия).

2. *Объем выполненных движений*. В понятие «объем двигательного задания» могут быть включены три биомеханические характеристики: пройденный путь, выполненная работа ($A = FS$), импульс силы ($S_i = F\Delta t$).

3. *Время выполнения двигательных действий* (например, 12 минутный тест Купера).

Биомеханическая оценка и анализ двигательных качеств (в том числе и выносливости) включает определение биомеханического измерителя и понимание физиологических и биохимических механизмов, лежащих в основе их проявления и в том числе механизм гидролиза и ресинтеза АТФ в митохондриях клеток. Концентрация и активность митохондрий, а, следовательно, и скорость аэробного образования АТФ определяют стойкость мышц к утомлению.

Биомеханическая характеристика скоростных качеств

Способность человека совершать двигательные действия в минимальный для данных условий отрезок времени характеризуется скоростными качествами. При этом предполагается, что выполнение задания производится за небольшое время и утомление не возникает. Принято выделять три основные (элементарные) разновидности появления скоростных качеств:

1. скорость одиночного движения (при малом внешнем сопротивлении);
2. частоту движений;
3. латентное время реакции.

Скорость элементарного двигательного действия в значительной мере зависит от наличия большого числа быстрых фазических мышечных волокон (гликолитического и окислительного типов). Эти мощные волокна быстро сокращаются, но вместе с тем в них рано развивается утом-

ление. Их быстрое сокращение можно объяснить, в частности, высоким значением числа оборотов активного центра миозиновой АТФазы (фермента, гидролизующего АТФ в мышечной клетке, в месте контакта миозиновой головки с актиновой нитью). Данные волокна включаются в работу, когда необходима очень большая скорость сокращения. АТФ продуцируется за счет гликолиза, и такие мышечные волокна бедны митохондриями. За время сокращения в волокнах возникает кислородная задолженность, которая потом восполняется. Знакомым примером данного типа волокон служат белые грудные мышцы домашней птицы, которые не переносят длительной двигательной активности.

Кроме того, важно заметить, что быстрые фазические окислительные волокна реагируют быстрым одиночным сокращениями, причем утомление у них наступает медленно. Причина заключается в том, что данный тип волокон содержит большое число митохондрий и способен интенсивно продуцировать АТФ путем окислительного фосфорилирования. Эти мышцы обеспечивают быстрые повторные движения – длительную энергичную локомоцию.

Между показателями скорости одиночного движения, частотой движений и латентного времени реакции у разных людей корреляция очень мала. Например, можно отличаться очень быстрой реакцией, но быть относительно медленным в отдельных движениях и наоборот. Имея это в виду, говорят, что элементарные разновидности скоростных качеств относительно независимы друг от друга.

В практике приходится обычно встречаться с комплексным проявлением скоростных качеств. Так, в спринтерском беге результат зависит от времени реакции на старте, скорости отдельных движений (отталкивания, сведения бедер в безпорной фазе) и частоты шагов (рис.50).

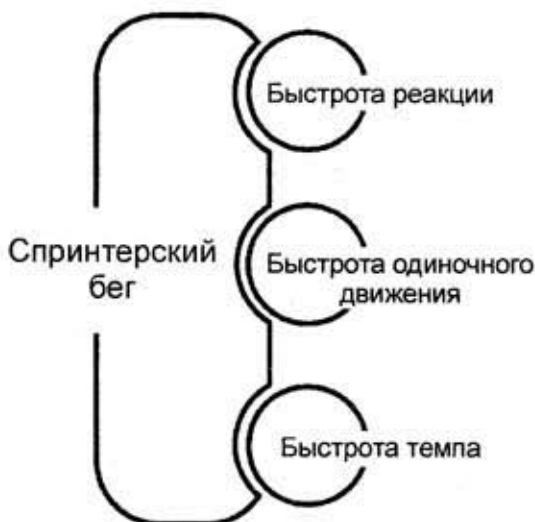


Рис. 50. Результат в спринтерском беге определяется всеми тремя разновидностями проявления быстроты движений.

Скорость, достигаемая в целостном сложно координированном движении, зависит не только от скоростных качеств спортсмена, но и других причин (например, скорость бега – от длины шагов, а та, в свою очередь, от длины ног, силы и техники отталкивания), поэтому лишь косвенно характеризует скоростные качества, и при детальном анализе именно элементарные формы проявления скоростных качеств оказываются наиболее показательными. В движениях циклического характера скорость передвижения непосредственно определяется его частотой и тем путем, который человек проходит за один цикл (длиной «шага»):

$$V = L \cdot T,$$

где V – скорость горизонтального перемещения (ходьбы, бег, плавание, лыжи и т.п.), L – длина одиночного шага, T – частота шагов (c^{-1} , темп движения). Соотношение скорости и длины шагов, например, в беге, могут хорошо описываться регрессионной моделью вида $y = 0,1445x + 0,8474$. Из анализа этого уравнения следует, что для увеличения скорости бега, например, на 0,5 м/с необходимо увеличивать длину шага на 0,145 м.

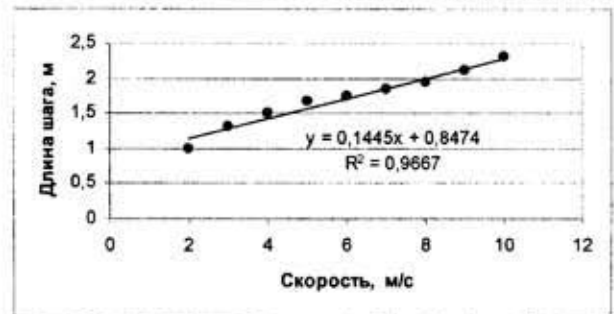


Рис. 51. Взаимосвязь длины шага (L) и скорости (V) бега в широком диапазоне скоростей от 2 м/с до 10 м/с

С ростом спортивной квалификации (а, следовательно, и с увеличением максимальной скорости передвижения) оба компонента, определяющие скорость передвижения, как правило, возрастают.

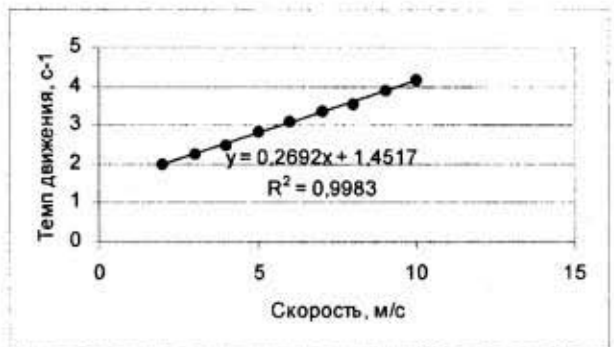


Рис. 52. Взаимосвязь темпа движений (T) и скорости движений в беге (V)

Однако в разных видах спорта это происходит по-разному. Например, в беге на коньках основное значение имеет увеличение длины «шага», а в плавании оба компонента вносят примерно равный вклад в формирование скорости передвижения. Вместе с тем, при одной и той же максимальной скорости передвижения, у разных спортсменов могут быть значительные различия в длине и частоте шагов.

Скоростные качества могут проявляться в разных видах двигательной деятельности по-разному. Например, изменение скорости может быть определено, как ее динамика. В практике спорта существуют два вида заданий, требующих проявления максимальной скорости. В первом случае необходимо показать максимальную мгновенную скорость (в прыжках – к моменту отталкивания; в метании – при выпуске снаряда). Динамику скорости при этом выбирает сам спортсмен (например, он может начать движение немного быстрее или медленнее). Во втором случае необходимо выполнить с максимальной скоростью все движения (в минимальное время, пример: спринтерский бег). Здесь тоже результат зависит от динамики скорости. Например, в спринтерском беге наилучший результат достигается в тех попытках, где мгновенные скорости на отдельных отрезках стартового разгона не являются максимальными для данного человека. Характеристикой первой фазы является стартовое ускорение, второй – дистанционная скорость.

Можно обладать хорошим стартовым ускорением и невысокой дистанционной скоростью и наоборот. В одних видах спорта главным является стартовое ускорение (баскетбол, теннис, хоккей), в других важна лишь дистанционная скорость (прыжки в длину), в-третьих, существенно и то и другое (спринтерский бег).

Реализация скоростных качеств протекает более эффективно, если в движении оптимизирована его силовая структура. Сила действия, которую проявляет человек в одной попытке, непрерывно изменяется. Это вызывает необходимость изучения скорости изменения силы – градиента силы. Градиент силы особенно важен при изучении движений, где необходимо проявлять большую силу в возможно короткое время – «взрывом».

В тех случаях, когда речь идет о перемещении собственного тела спортсмена (а не снаряда), удобно пользоваться так называемым коэффициентом реактивности «К» (по Ю. В. Верхованскому, 1989):

$$K = F_{max} / t_{max} \cdot \text{вес тела}$$

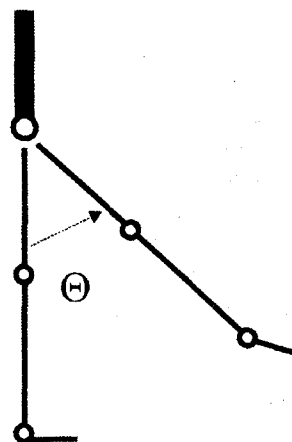
Скорость нарастания силы играет большую роль в быстрых движениях. С ростом спортивной квалификации время выполнения движений обычно сокращается и поэтому роль градиента

силы становится более значимой. Время, необходимое для достижения максимальной силы (t_{max}), составляет примерно 300–400 мс. Время проявления силы действия во многих движениях значительно меньше. Например, время отталкивания в беге у сильнейших спринтеров длится менее 100 мс, отталкивание в прыжках в длину – менее 150–180 мс, отталкивание в прыжках в высоту – менее 250 мс, финальное усилие в метании копья – примерно 150 мс и т. п. [Д.Д. Донской, В.М. Зациорский, 1979].

Во всех этих случаях спортсмены не успевают проявить свою максимальную силу, и достигаемая скорость зависит в значительной степени от градиента силы. Например, между высотой прыжка вверх с места и коэффициентом реактивности очень большая корреляция (прыгает выше тот спортсмен, кто при том же собственном весе может развить большую силу отталкивания за наименьшее время).

Биомеханическая характеристика гибкости

В качестве биомеханического измерителя для оценки гибкости используется максимальная



величина углового перемещения биоэвена или всей биоцепи (например, ноги) относительно оси сустава (рис. 53). Поэтому гибкость как двигательное качество можно определить как способность человека выполнять движения с большой амплитудой в суставах.

Рис. 53. Перемещение ноги относительно тазобедренного сустава на величину угла θ как показатель подвижности относительно этого сустава (амплитуда движения)

Термин «гибкость» используется обычно в общем смысле. При анализе движений в отдельных суставах говорят о степени подвижности в них. Для точного измерения подвижности в суставах (гибкости) надо измерить угол в соответствующем сочленении в крайнем возможном положении между сочленяющимися звеньями. Измерение углов движений в суставах, как известно, называется гониометрией (от греч. «гони» – угол и «метр» – мера). Поэтому говорят, что для измерения гибкости используются гониометрические показатели. В практике контроля за физической подготовленностью для измерения гиб-

кости нередко используют не угловые, а линейные меры (например, величину наклона вперед, измеренную относительно опоры). Однако необходимо помнить, что в этом случае на результате измерения могут сказаться размеры тела, например, длина рук (при наклоне вперед или выполнении «выкрута» с палкой), длина туловища (при измерении расстояния между руками и ногами во время выполнения гимнастического моста). Поэтому линейные меры менее точны, и, применяя их, следует вводить поправки, устраняющие нежелательное влияние размеров тела.

Выделяют активную и пассивную гибкость. *Активная гибкость* – способность выполнять движения в каком-либо суставе с большой амплитудой за счет активности мышечных групп, проходящих через этот сустав (например, амплитуда подъема ноги энергичным движением ее вперед-вверх).

Пассивная гибкость определяется самой большой амплитудой движения в суставе, которую можно достичь за счет приложения внешних сил. Показатели пассивной гибкости больше соответствующих показателей активной гибкости. Разница между ними называется *дефицитом активной гибкости*. Он определяется зависимостью «длина – сила тяги активной мышцы», в частности, величиной силы тяги, которую может проявить мышца при своем наибольшем укорочении. Если эта сила недостаточна для дальнейшего перемещения сочленяющихся звеньев тела, то говорят об недостаточности тяги мышцы.

Экспериментально показано, что недостаточность тяги может быть уменьшена (соответственно уменьшен дефицит активной гибкости и повышена сама активная гибкость) за счет силовых упражнений, выполняемых с большой амплитудой движения. Рост силовых качеств приводит в этом случае к увеличению показателей активной гибкости.

Гибкость зависит от ряда условий: температуры окружающей среды (повышение температуры приводит к повышению гибкости), времени суток (в середине дня она выше), разминки и др.

В спорте не следует стремиться к предельному развитию гибкости. Ее надо развивать лишь до такой степени, которая обеспечивает беспрепятственное выполнение необходимых движений. При этом величина гибкости должна несколько превосходить ту максимальную амплитуду, с которой выполняется движение («запас гибкости»). Например, высоко квалифицированные прыгуны на лыжах с трамплина используют в полете запас активного разгибания (тыльного сгибания) стопы в среднем на 94%. Нередко у спортсменов наблюдается прямая корреляция между показателями гибкости и амплитудой движений в основных упражнениях. Например, показатели активной гибкости при разгибании стопы следующим образом связаны с амплитудой соответ-

ствующих движений [по Ф. Л. Доленко, цит. по Д.Д. Донскому и В.М. Зацюрскому, 1979]:

В прыжках на лыжах	0,93 (мастера)
При рывке штанги (в «низкий сед»)	0,94 (разная квалификация)
В беге на коньках	0,85 (мастера) 0,36 (новички)

Высокая корреляция говорит о том, что спортсмены с большими показателями гибкости имеют преимущество в спортивной технике: они выполняют основное спортивное движение с большей амплитудой.

Биомеханическая характеристика силовых качеств человека

Человек испытывает ощущение мускульного усилия, перемещая какое-либо тело с одного места на другое, при изменении его скорости и т. п. По аналогии с этими ощущениями силой называется всякое действие одного тела на другое, в результате которого тело изменяет свое механическое состояние.

Если изменение состояния тела выражается в изменении скорости его движения, то говорят о *динамическом проявлении силы*. При медленной деформации тела имеет место *статическое проявление силы*.

Действие силы на тело определяется: 1) точкой приложения силы, 2) направлением силы и 3) численным значением (модулем) силы, которое находят путем ее сравнения с некоторой другой силой, принимаемой за единицу. За единицу силы в практике и в технической системе единиц принимается килограмм, то есть вес международного эталона, равный весу одного кубического дециметра чистой воды при 40 °С на уровне моря и широте 45°.

В международной системе единиц за единицу силы принимается сила, называемая ньютоном. 1 кг = 9,80665 Н, для приближенных расчетов – около 10 Н.

Приборы, служащие для измерения силы, называются динамометрами. Принцип действия динамометра основан на том, что до известных пределов деформация упругого элемента (пластины) или растяжение пружины пропорциональны силе, их вызывающей, и прекращаются по прекращению действия силы.

В практической биомеханике силой, проявляемой человеком, называется мера воздействия его на внешнее физическое окружение, передаваемая через рабочие точки тела. Примерами могут служить сила действия на пластину кистевого динамометра, стопами на опору, сила тяги за рукоятку станкового динамометра и т. п. Сила действия человека, как и всякая другая сила, может быть представлена в виде вектора и оп-

ределена указанием: 1) направления, 2) величины и 3) точки приложения. Силы можно не только складывать, получая равнодействующую; их можно также разлагать на составляющие, которые действуют в различных направлениях. Например, на рис. 54. показано тело, на которое в точке P действует сила F, направленная под углом θ к горизонтالي. Эту силу можно разложить на вертикальную составляющую $F \sin \theta$ и горизонтальную составляющую $F \cos \theta$. Другими словами, вертикальная сила и горизонтальная сила, приложенные одновременно в точку P, производили бы точно такое же действие, как сила F.

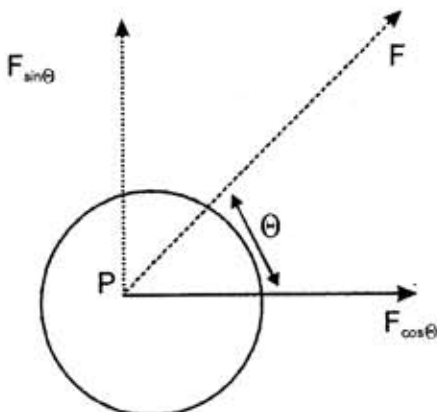


Рис. 54. Разложение силы на вертикальную и горизонтальную составляющие

Сила действия человека зависит от состояния данного человека и его волевых усилий, то есть стремления проявить ту или иную величину силы, в частности максимальную силу, а также от внешних условий, в частности от параметров двигательных заданий.

Понятие силовых качеств

Силовые качества характеризуются максимальными величинами силы действия (F_{max}), которую может проявить тот или иной человек. Вместо термина «силовые качества» используют также термины «мышечная сила», «силовые возможности», «силовые способности». В спортивной науке и на практике наиболее распространенной является следующая классификация силовых качеств:

Силовые качества:

Собственно-силовые (статическая сила).

Скоростно-силовые:

а) динамическая сила;

б) амортизационная сила.

Условия проявления:

Статический режим и медленные движения.

Быстрые движения.

Уступающие движения.

Сила действия человека непосредственно зависит от сил тяги мышц, то есть сил, с которыми отдельные мышцы тянут за костные рычаги. Однако между натяжением той или иной мышцы и силой действия нет однозначного соответствия. Это объясняется, во-первых, тем, что почти любое движение происходит в результате сокращения большого числа мышечных групп (сила действия – итог их совместной активности) и, во-вторых, тем, что при изменении суставных углов меняются условия тяги мышц за кость, в частности плечи сил мышечной тяги. Поэтому закономерности биодинамики мышц, рассмотренные ранее, проявляются в движениях человека в более сложном виде (еще и потому, конечно, что на проявления силы действия в решающей мере влияют физиологические и психологические факторы).

Рассмотрим зависимость силы действия от таких характеристик двигательных заданий, как: а) скорость движущегося звена тела, и б) направление движения.

Связь «сила – скорость». Если выполнять бросок снаряда различного веса, измеряя скорость его вылета и проявленную силу действия, то сила и скорость будут находиться в обратно пропорциональной зависимости: чем выше скорость, тем меньше проявленная сила, и наоборот. В крайнем случае, когда метаемый снаряд будет настолько тяжелым, что его уже нельзя сдвинуть с места, можно проявить наибольшую силу действия (статическое усилие, скорость равна нулю).

Наоборот, при движении свободной, ненагруженной отягощением руки (масса «метаемого снаряда», и сила действия, приложенная к нему, равны нулю), скорость будет наибольшей. При анализе толкания спортивного ядра выявляется, что скорость и сила имеют некоторые средние величины. При изучении зависимости «сила – скорость» в лабораторных условиях на изолированных мышцах получают довольно точные соотношения, описываемые уравнением Хилла. «Кривая Хилла» сохраняет свою форму, если в эксперименте удастся зарегистрировать силу и скорость сокращения отдельной мышцы у человека. С другой стороны, в реальных случаях регистрации силы действия, обусловленной совокупной активностью многих мышц, картина несколько сложнее. Однако, в односуставных движениях зависимость, как правило, полностью сохраняется.

При анализе движений, организованных как многосуставные, взаимосвязь сил и скоростей может заметно меняться. Так, например, при бросках с места тел разной массы оказывается, что тело массой 200 г спортсмены высокой квалификации бросают дальше (придают большую скорость вылета), чем при броске более легкого снаряда – массой 100 г. Вместе с тем необходимо подчеркнуть, что обнаруженная на отдельных мышцах зависимость между силой и скоростью,

проявляется и в сложно координированных движениях человека.

Для развития силовых качеств в практике спорта применяются специальные силовые упражнения. Специальными называются упражнения, применяемые одновременно для совершенствования техники и двигательных качеств, проявляемых при выполнении основного соревновательного движения. Эти упражнения выполняют свое назначение, если они достаточно близки к соревновательному движению. С биомеханической точки зрения такие упражнения должны удовлетворять так называемому принципу динамическому соответствия:

- по направлению и амплитуде совпадать с соревновательным движением;
- иметь акцентированный участок рабочей амплитуды движения;
- проявлять силу действия сходной величины с соревновательным движением;
- иметь совпадающую быстроту развития максимума силы;
- реализовать сходный режим работы мышц.

В качестве специальных силовых упражнений в современном спорте используют основные соревновательные движения с искусственно увеличенным сопротивлением.

Резюме

Двигательные качества представляют собой особые стороны моторики человека.

Двигательные качества, проявляемые в разных видах двигательной деятельности, имеют общий биомеханический измеритель, сходные физиологические и биомеханические механизмы и требуют проявления сходных свойств психики.

Методики совершенствования определенного двигательного качества имеют общие черты независимо от конкретного вида движения.

Измерителями таких двигательных качеств, как мышечная сила, быстрота, выносливость, являются сила, скорость и длительность (время) движения.

При оценке двигательных качеств необходимо иметь в виду, что сила (F), скорость (V), и длительность движения (Δt) находятся в определенном соотношении друг с другом. Оно различно в разных двигательных заданиях.

Двигательным заданием принято считать движение со строго оговоренными условиями его выполнения (параметрами). Например, не плавание вообще или метание спортивного снаряда, а плавание на дистанцию 50 метров брассом или метание теннисного мяча.

Параметром называется в науке переменная величина, которая в условиях конкретной рассматриваемой задачи остается постоянной. Следует отличать параметры от констант. Примером параметра может быть время бега (12 мин) в тесте Купера.

Вопросы для повторения и закрепления материала главы

1. Биомеханические основы двигательных качеств.
2. Биомеханические характеристики, лежащие в основе оценки выносливости.
3. Биомеханические механизмы, лежащие в основе повышения выносливости.
4. Биомеханика скоростных качеств. Быстрота, ее биомеханическое обоснование. Виды проявления быстроты движения.
5. Особенности мышц, проявляющиеся при реализации разных двигательных качеств.
6. Основы гибкости и ее биомеханические закономерности.
7. Активная и пассивная гибкость.
8. Биомеханические проявления силовых качеств человека.
9. Зависимость силы действия от условий двигательной деятельности.
10. Биомеханические особенности проявления силовых качеств.

Глава 12. Системы движений и организация управления

Двигательные действия человека объединяют в целое множество отдельных движений. Спортивное и бытовое действие в биомеханике изучается как система движений, которой управляет спортсмен. Для лучшего обучения спортивной технике и овладению ею надо знать основные задачи управления, принципы организации движений в целостную систему и понимать те изменения, которые могут происходить при формировании и совершенствовании техники движений.

Итак, биомеханика рассматривает упражнения как систему взаимодействующих элементов (его частей). Например, гимнастическая комбинация. Входящие в систему элементы определяют ее состав. Элементами системы являются те движения, из которых она состоит. Это могут быть, например, фазы или периоды. Например, фазы бегового шага (рис. 55).



Рис. 55. Пример двигательного действия как системы, составленной из отдельных фаз

Способ организации системы или принцип объединения элементов в системы называют структурой системы. Иными словами *структура системы* – это сложившиеся и определяющие закономерности взаимодействия элементов в ней. Объединение элементов и их взаимодействие способствуют проявлению системой таких свойств, каких нет у отдельных элементов. Это так называемые системные или эмерджентные свойства. Например, сам по себе отдельный элемент «прыжок с места в длину» позволяет преодолеть полетом максимальное расстояние 2,0–2,3 м, тогда как объединение его в систему с другими элементами (разбегом, отталкиванием, полетом и приземлением) позволяет выполнить полет на 5–6 м.

Если рассматривается объединение движений в целостную систему в пространстве или во времени, то это будет его кинематическая структура. Этот вид структур системы движений, или способ объединения элементов в единое целое может быть ведущим в таких видах спорта как гимнастика, акробатика, фигурное катание, син-

хронное плавание. В этих видах двигательной деятельности важно раскрыть внешнюю картину движения, то есть реализовать подходящую кинематическую структуру. При обучении физическим упражнениям часто требуется в первую очередь установить кинематическую структуру движений, как их видимую организацию в целую систему, то есть описать их.

Однако для всестороннего анализа движений и эффективного обучения им необходимо учитывать инертные свойства биоэлементов и всего тела, характер приложения и величины сил, действующих на тело, представить энергетику движений (затраты и способы экономии энергии). Нужно определить согласованность сил. От того, как скоординированы силы, зависит совершенство движений. Степень согласованности сил и определяет динамическая структура движений.

Динамические структуры оценивают на основе изучения динамических характеристик (все его комплекс, включающего инерционные, силовые и энергетические характеристики). Если ставится задача выявить динамическую структуру движения, найти закономерности координации сил и оценить их результат – это означает, что требуется объяснить механизм возникновения и изменения движений. В свою очередь это приводит к проблеме управления движениями.

Самоуправляемые системы

Самоуправляемые – это такие системы, где аппарат управления расположен в самой системе. Они характеризуются тем, что управление ими протекает по базовым законам управления и вносится в систему не извне, а осуществляется внутри самой системы. К таким самоуправляемым системам относится и человек – он сам инициирует выполнение движений и сам ими управляет. Комплексы движений человека также представляют собой самоуправляемую систему (система процессов), поскольку управляющие воздействия создаются и реализуются внутри этой системы.

Общие принципы управления

Управление можно определить как процесс перевода системы из одного состояния в другое, заранее заданное. Порядок смены состояний системы рассматривается как поведение системы. Линия поведения системы определяется последовательной сменой ее промежуточных состояний. Управление представляет собой измене-

ние состояния системы посредством управляющих воздействий, которые направлены на достижение цели. Каждая система имеет определенное состояние в любой момент времени. Различают начальное состояние (до начала управления), конечное (заданное заранее) – как задаваемый результат управления и ряд промежуточных состояний.

Перевод системы в заранее заданное состояние предполагает наличие цели. В этом случае цель управления состоит либо в заданном заранее конечном состоянии (конечный эффект атаки боксера, результат метателя диска), либо в обеспечении заданной линии поведения (исполнение программы фигурного катания). Для достижения конечного состояния необходимо обеспечить точную линию поведения.

Если движение выполняется в переменных условиях, то цель уточняется по ходу действия, в зависимости от изменяющейся ситуации. Биомеханические характеристики служат для определения состояния и поведения системы движений. Они дают информацию о ходе движений, отражают те или иные стороны самой двигательной деятельности человека.

Таким образом, совокупность характеристик – это только отображение действительности, самого процесса движений и управления им. Управляемая же система движений представляет собой сами движения человека.

Для понимания процессов управления системами обычно используют классическую блок-схему, которая включает объект управления (мышца, ученик, спортсмен и т. п.), аппарат управления (структура ЦНС) и каналы связи: прямой и обратный (рис. 56).



Рис. 56. Система управления. Стрелками показано движение управляющей информации по каналам прямой (1) и обратной связи (2).

Цель управления достигается с помощью управляющих воздействий (движения информации по каналам прямой и обратной связи, см. рис.), которые изменяют состояние системы в необходимом направлении. Можно заключить, что управление – это процесс достижения цели.

Обеспечение оптимума реализации спортивной техники производится с помощью основных

управляющих воздействий – мышечных усилий. С их помощью происходит также управление и другими силами (инерции, трения, тяжести, и др.). Кроме управляющих всегда (в большей или меньшей мере) существуют сбивающие воздействия, мешающие достижению цели (помехи, вредные сопротивления). Вследствие неточности управляющих команд, а также из-за сбивающих воздействий, достижение цели происходит с отклонениями от заданных требования. При этом повторные выполнения двигательных заданий с коррекцией каждой попытки выполнения приводит к достижению поставленной цели, через ряд отклонений и восстановлений, то есть при снижении амплитуды флуктуаций (рис. 57).

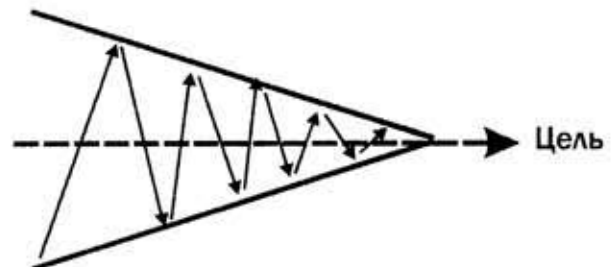


Рис. 57. Достижение цели через ряд отклонений (флуктуаций) в функционировании системы

В технике движений отклонения разделяют на недостатки и ошибки. К недостаткам целесообразно относить только те отклонения, при которых исполнение в основном качественно правильно, однако при этом качественно недостаточно. В таких случаях обычно требуется приложить больше усилий, увеличить скорость и др. без коренной качественной перестройки всей сложной системы движений.

Ошибками в спортивной технике принято считать выраженные отклонения, которые требуют устранения, исправления, коренной качественной перестройки структуры двигательного действия (то есть приходится данное движение заменить более рациональным). Для ликвидации отклонений в структуре движений используются коррекции – дополнительные (исправляющие) управляющие воздействия.

Коррекции бывают двух видов:

- регулирование по отклонению;
- регулирование по возмущению (по сути, это предварительные приспособления).

Внесение исправлений в систему движений после отклонения не всегда может устранить последствия уже наступивших отклонений, особенно когда скорости выполнения движений весьма велики (например, при проведении ударов). Коррекции «по предупреждению» обеспечивают приспособительную изменчивость системы и тем самым препятствуют наступлению существенных отклонений в структуре движения.

Для повышения эффективности управления движениями человека можно использовать и внешние управляющие воздействия (создание управляющей среды). В качестве примера можно привести чисто физическое воздействие извне (вынуждающий тренажер, поддержка, помощь, страховка). В этом случае говорят об «искусственной управляющей среде» [И.П. Ратов, 1972].

Особенности самоуправления движениями человека

При анализе физиологических механизмов управления движениями было установлено, что этот процесс может иметь кольцевой, циклический характер. В работах Н.А. Бернштейна показаны периферический и центральные циклы взаимодействия. Рассматривая периферический цикл можно выделить мышечные усилия, которые и действуют на окружение, противодействие внешних сил, которые затем отражаются на величине мышечных усилий. Центральный цикл взаимодействия (мозг – мышцы) заключается в том, что мозг посылает сигналы (управляющую информацию) и изменяет своими командами состояние мышц и, значит, движения; сигналы же, вызванные движениями тела спортсмена, влияют на управление, через петлю обратной связи со стороны мозга (рис. 58).

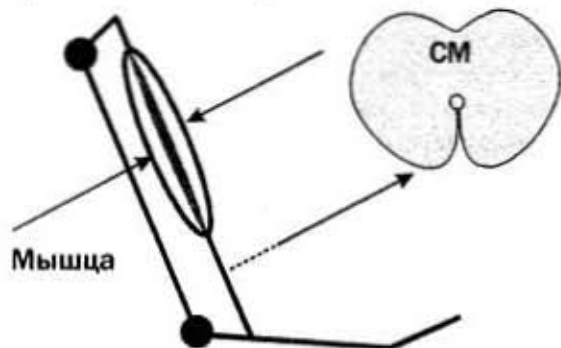


Рис. 58. Прямая и обратная связь на уровне управления «мозг – мышца» (СМ – спинной мозг)

Процесс движения начинается с его подготовки. От внешнего окружения (точнее, от сенсорной части поля действия) по каналам обратной связи поступают сигналы об обстановке предстоящего действия, а от подсистемы исполнения (самого спортсмена) – об ее готовности к действию. С учетом этих сигналов от подсистемы управления уже по каналам прямой связи следуют команды к подготовке. Они относятся и к подсистеме непосредственного исполнения, и к обслуживающей подсистеме энергетического обеспечения. После необходимой подготовки, которая может происходить даже в доли секунды, подаются пусковые команды. В ходе движе-

ния по каналам обратной связи поступают сведения об изменениях и в окружении, и в состоянии организма (в самом широком смысле). На этой основе ведется текущее управление движениями, происходит его согласование, обеспечивается их целостность, соответствие внешним и внутренним изменениям, направленность на решение задачи.

Приведенные общие понятия о процессах управления соответствуют не только известным, но и во многом еще неизвестным физиологическим процессам. Эти понятия позволяют выделить главный смысл процесса управления, помогают оценить значение каждой составной части схемы управления. Из этой схемы видно, что обратная связь является неперенным условием текущего управления в сложных переменных условиях. Отсюда, конечно, не следует, что сама обратная связь осуществляет управление. Без отличной работающей подсистемы управления никакая самая совершенная обратная связь сама по себе не решает задач управления.

Понимание кольцевого характера процесса управления исключает неверное представление о том, что достаточно только создавать совершенные команды и движения будут правильными. Н.А. Бернштейн, первым решивший в принципе задачу управления движениями, писал: «Движение возможно лишь при условии тончайшего и непрерывного, согласования центральных импульсов с явлениями, происходящими на периферии тела».

Для правильного понимания движения человека, путей их формирования и совершенствования, необходимо принимать во внимание управление ими.

Управление движениями в переменных условиях

Необходимо иметь в виду, что практически всегда движения выполняются в переменных условиях, как бы ни казались они постоянными. Каждое движение сопровождается изменением мышечных усилий, положения звеньев тела и их скоростей, взаимодействия с опорой, с другими физическими телами и средой. Возникают, изменяются и исчезают внешние силы.

Таким образом, внутренние и внешние механические условия переменны. Поэтому переменны и потоки информации, что и обуславливает приспособление движений к условиям действия. Управление движениями в таких условиях чрезвычайно сложно и вместе с тем совершенно.

Функциональная структура двигательного действия

Функциональная структура двигательного действия – это закономерности такого объединения множества функций (функциональной си-

стемы, по П. К. Анохину), которое необходимо для успешного решения двигательной задачи.

Для выполнения любого действия в организме формируется функциональная система – объединение множества функций. К ним относятся энергетическое обеспечение действия, само двигательное исполнение и управление тем и другим процессами. В биомеханическом аспекте рассматривается комплекс, который включает состав системы движений, ее кинематическую и динамическую структуры. Здесь, естественно, не рассматриваются аспекты психологические (потребности, установка и др.), физиологические (механизмы высшей нервной деятельности), биохимические (превращение химической энергии в механическую).

Для управления системой движений необходима, прежде всего, цель управления – двигательная задача действия. Двигательная задача действия включает общую цель системы движений, детализацию ее по подсистемам, направления оптимизации движений и на этой основе требования к движениям.

Общая цель определяет, то чего следует достичь в данном двигательном действии. У каждой подсистемы (элементарного действия, фазы) имеется своя частная цель (подцель) как требуемый результат. Только выполнение каждой подсистемой своей детализованной частной подцели обеспечивает достижение общей цели. Это своего рода разделение функций, специализация. В свою очередь, каждая подцель достигается путем оптимизации, улучшения движений в определенном направлении.

При определении задачи оптимизации не идет речь о конкретных движениях, а только в общем виде определяется, чего именно в этой подсистеме следует добиваться (например, уменьшить сопротивление воды, уменьшить трение). И лишь на этой основе возникают и уточняются конкретные требования к движениям.

В этой связи можно рассматривать двигательную задачу как замысел, модель предстоящего действия (по Н. А. Бернштейну). Она включает, следовательно, задаваемый результат, а также направления и средства совершенствования ее достижения.

При наличии более или менее развернутой двигательной задачи подготовка спортсмена ведется более совершенно – у него создаются программы управления.

Программы управления включают выработанные возможности выполнения движений (двигательные качества и навыки) и приспособления их к переменным условиям двигательного действия. В процессе спортивной тренировки развиваются двигательные качества, формируются двигательные навыки, создаются возможности решения двигательных задач. Учитывая вышесказанное, можно заключить, что с точки зрения управления движе-

ниями, научение и тренировка обеспечивают накопление двигательных возможностей на основе врожденных способностей и памяти. Происходит накопление множества программ управления.

Накопление и закрепление программ управления – очень многосторонний процесс потому, что и само управление имеет много сторон. Следовательно, программа управления предопределяет путь и способы решения задач с использованием созданных возможностей на основе содержащихся в двигательной задаче требований. Контроль над выполнением программы осуществляется при помощи сигналов обратной связи: они обеспечивают слежение, сличение, поправки, перестройки и другие процессы, оптимизирующие управление.

Итак, управление движениями осуществляется благодаря передаче и переработке информации: устанавливается двигательная задача; выбираются необходимые, выработанные заранее в процессе тренировки программы, а также создаются новые; передаются команды мышцам (произвольные и автоматические); ведется контроль над ходом действия; вносятся коррекции.

Оптимизация управления

Оптимизация управления в спортивной технике включает поиск оптимальной модели двигательного действия (предмета обучения), пути его построения (методики обучения) и наиболее совершенного выполнения действия. Оптимизация модели осуществляется посредством научных исследований различных сторон и деталей механизма двигательных действий. Целостная модель строится на основе экспериментальных данных, теоретического анализа и практического поиска.

Оптimum (что-то наиболее соответствующее задаче в данных условиях) может быть только один. Если же изменяются условия, то изменяется и optimum. Но так как условия движений переменны, то и каждым условиям соответствует свой optimum. При более или менее сходных условиях имеются более или менее сходные, близкие optimumы, их вариации.

Таким образом, можно заключить, что оптимальной методике обучения и совершенствования служит модель рациональной техники, понимание особенностей ее деталей, их взаимосвязей, глубокого смысла каждого требования к движениям, то есть биомеханическое обоснование техники.

Создание и совершенствование систем движений

При обучении новым упражнениям: а) используются соответствующие, ранее сформированные подсистемы движений; б) затормаживаются подсистемы, непригодные для решения

данной задачи; в) формируются новые подсистемы, необходимые для решения новой двигательной задачи; г) происходит (на этой основе) формирование структуры вновь создаваемой системы движений.

Двигательная деятельность человека отличается чрезвычайной способностью и к функциональной перестройке, и к накоплению форм поведения. С возрастом и накоплением двигательного опыта создаются все большие возможности использования ранее освоенных движений.

Поскольку возникает новая двигательная задача, для ее решения необходима выработка новых подсистем движений и вместе с тем подавление тех подсистем, которые не могут быть использованы, но могут помешать решению новой задачи.

При построении системы движений ставится ряд задач. Прежде всего, необходимо ознакомление с новым упражнением (рассказ, показ, видеопрезентация) – создание модели упражнения, установление требований к его выполнению. Ознакомление включает в себя теоретическое понимание внешней картины (описание) и механизма (объяснение) движений, их кинематики и динамики, создание зрительного образа при наблюдении за показом и особенно получение двигательных ощущений при первых попытках выполнения упражнения в целом или подводящих к нему упражнений.

В процессе ознакомления создается двигательное представление. Это происходит не сразу, а нередко после многократного повторения с уточнением на последующих ступенях обучения. В основе ознакомления лежат методы рассказа,

показа и пробного выполнения упражнения.

Следующая группа задач – освоение разучиваемого упражнения или его деталей. Оно продолжается до тех пор, пока спортсмен не сможет в основном правильно и уверенно выполнять основные требования, предъявляемые к данному движению. Построение системы выполняется преимущественно аналитическим путем: с помощью подводящих упражнений формируются элементы будущей системы, а потом из них складывается целое упражнение (например, в гимнастике).

В некоторых случаях для освоения ряда упражнений более пригоден синтетический путь: сначала в общем виде создается целое, а потом совершенствуются его детали (типичный пример, в плавании сначала изучается отдельно движение рук, движение ног, положение тела в воде, затем согласование отдельных элементов в целое). Оба пути тесно связаны, применяются в зависимости от особенностей разучиваемого упражнения, могут чередоваться по ходу обучения.

Третья группа задач связана с применением упражнения для повышения эффективности упражнения (достижения более высокого результата) и надежности его исполнения (при заданном результате). Все три группы задач ставятся не только при начальном формировании системы движений, но и в процессе дальнейшего совершенствования техники спортивных движений.

Следовательно, необходимо иметь в виду, что это не последовательные этапы обучения, однократно сменяющие друг друга, а эти задачи ставятся снова и снова, многократно и каждый следующий раз на более высоком уровне.

Резюме

Для практического применения биомеханических знаний удобно рассматривать двигательные действия как системы. При этом определение системы звучит как упорядоченное множество (элементов или элементарных движений) взаимодействующих элементов. У системы выделяют ее состав, то есть входящие в нее элементы и структуру – закономерности объединения элементов в единый комплекс – систему.

Двигательная деятельность осуществляется человеком как управляемый процесс, где управление – это процесс достижения цели или перевод системы из одного состояния в другое, заранее заданное.

При рассмотрении физического упражнения выделяют двигательную задачу как цель, которую необходимо достичь в результате выполнения данного движения, и программу как последовательность этапов решения двигательной задачи и, следо-

вательно, достижения цели.

При управлении движениями выделяют управляющие и сбивающие воздействия. При реализации управляющих воздействий могут возникать помехи в каналах связи, и это ведет к погрешностям и двигательным ошибкам. Для оптимизации управления необходимо организовать четкую работу прямой и обратной связи в системе. Информация рассматривается как мера устраненной неопределенности, как сообщение об изменении состояния объекта.

Управление движениями, его оптимизация позволяют успешно решать педагогические задачи обучения двигательным действиям.

Вопросы для повторения и закрепления материала главы

1. Определение системы.
2. Состав системы.
3. Структура системы. Виды структур.
4. Информация, ее определения.
5. Блок схема управления с каналами связи (прямая и обратная связи).
6. Что такое управление вообще?
7. Управление движениями как системами.
8. Двигательная задача и двигательная программа.
9. Разнообразие программ при решении двигательной задачи.
10. Самоуправляемые системы. Прямая и обратная связь в них.
11. Управление движениями в переменных условиях.
12. Управляющие и сбивающие воздействия.
13. Управление на уровне «ЦНС – мышца».
14. Роль управления движениями в обучении и тренировке.

Глава 13. Возрастные изменения моторики

Развитие движений человека, его моторика, как известно, осуществляется в онтогенезе под влиянием естественных и специально организованных стимулов и поэтому несет в себе отпечаток как чисто биологических, так и социальных детерминант. И те и другие фокусируются в трех главных факторах развития движений:

- генетически обусловленной «программе» развития двигательной функции и обеспечивающих ее реализацию морфологических и функциональных системах;
- спонтанной двигательной активности, стихийно реализуемой в жизненно необходимых локомоциях, а также трудовой, учебной и игровой деятельности;
- организованных и самостоятельных формах физического воспитания и спортивной подготовки.

Фундаментальной возрастной проблемой моторики является познание естественных законов развития двигательного потенциала человека и обоснование путей, средств и методов использования этих законов в педагогической и медицинской практике, управления процессом становления, развития и восстановления движений.

Установка на познание законов эволюции движений через изучение моделей ее естественного развития является центральным звеном и главным инструментом в методологическом арсенале эволюционной биомеханики. Это определяется, прежде всего, тем обстоятельством, что естественная сущность законов развития физического потенциала человека сформировалась еще в филогенезе и поэтому имеет фундаментальный характер.

Эволюционная биомеханика рассматривает, в том числе и индивидуальное развитие движений человека (онтогенез моторики). Онтогенезом моторики называют изменения движений и двигательных возможностей человека на протяжении его жизни. Хорошо известно, что ребенок в раннем постнатальном онтогенезе, является существом, не владеющим даже простейшими произвольными движениями. С возрастом его двигательные возможности расширяются, достигая расцвета в молодости, и постепенно снижаются к старости.

Роль созревания и научения в возрастных изменениях двигательных возможностей человека

Совершенствование двигательных возможностей в процессе возрастного развития происходит под влиянием двух факторов: созревания и научения. Их вклад в формирование системы

движений ребенка на каждом возрастном этапе может быть разным.

Необходимо иметь в виду, что созреванием называют наследственно обусловленные изменения морфологии и физиологических функций организма, происходящие в течение жизни человека (увеличение размеров и изменение формы тела ребенка в процессе его роста, изменения, связанные с половым созреванием, с процессами естественного старения и др.). В раннем постнатальном онтогенезе решающее значение имеет дозревание нервной системы и мышечного аппарата (всех структур ЦНС, в частности, коры больших полушарий головного мозга, которая к моменту рождения еще не сформировалась функционально, структурных и функциональных деталей мышц). Двигательный аппарат (кости, мышцы, сухожилия и связки) формируется только лишь к 2-3 годам.

Другое слагаемое развития моторики ребенка – научение является результатом педагогического воздействия. Имеется в виду освоение новых движений или совершенствование в них под влиянием специально организованной практики и на основе реализации механизмов процедурной памяти (обучение и тренировка). Взаимодействие этих факторов: созревания и научения может протекать по трем сценариям:

1. нейтральный;
2. синергический (однаправленный);
3. антагонистический (противоположный).

Важно заметить, что при синергическом варианте развития событий суммарный эффект может быть больше, чем сумма вклада каждого из факторов. У детей, воспитывающихся в обычных условиях, существует определенная последовательность овладения основными двигательными действиями. При исследовании близнецов установлено, что ребенок, находящийся в обществе чужих людей, обучается брать в руку игрушку, сидеть, стоять и ходить в определенные сроки независимо от того, обучали его или нет этим действиям. Это пример нейтрального взаимодействия созревания и обучения.

Обучение как педагогическое воздействие эффективно лишь при условии, что достигнута определенная степень биологической зрелости организма ребенка. В жизни человека есть чувствительные периоды – периоды биологического развития (определенные возрастные периоды) наиболее благоприятные для овладения различными двигательными действиями или для приобретения соответствующих двигательных (физических) качеств. Задача педагога заключается в том, чтобы приуро-

чить обучающие мероприятия к сенситивному периоду развития и тем самым добиться синергизма процессов созревания и научения.

Вместе с тем, слишком раннее обучение мешает освоению двигательных действий. Ранняя спортивная специализация, как правило, препятствует достижению высоких спортивных результатов в зрелом возрасте, особенно в силовых и скоростно-силовых видах спорта. Например, атлетической гимнастикой и другими силовыми видами спорта не следует заниматься до того, как закончится созревание фосфагенной энергетической системы, то есть до 16-17 лет. В противном случае научение и созревание окажутся антагонистами, в результате чего этот вид спортивной тренировки, занятия физкультурой будет, по меньшей мере, бесполезным, а в ряде случаев может даже причинить вред растущему организму.

В каждом виде двигательной деятельности есть возрастной диапазон, в котором достигаются самые высокие спортивные результаты. В подавляющем большинстве случаев границы этого диапазона простираются от 16 до 30 лет – это возраст расцвета двигательных возможностей человека. Анализ результатов в разных видах спорта позволил заключить, что большая часть спортсменов достигает выдающихся успехов [Д.Д. Донской, В.М. Зацюрский]:

- фигурное катание, плавание, гимнастика – 14-22 года;
- спортивные игры, бокс, горные лыжи – 22-24 года;
- гребля, коньки, хоккей – 24-28 лет;
- лыжные гонки, фехтование, биатлон, современное пятиборье – 25 – 33 года.

Таким образом, из вышеприведенных данных следует, что средний возраст победителей крупнейших международных соревнований тесно связан с периодом достижения наивысшего уровня ведущего в данном виде спорта двигательного качества. Например, во многих циклических видах спорта важнейшим качеством является выносливость, достигающая наибольших величин в возрасте от 25 до 35 лет. В этой связи в легкой атлетике, например, наблюдается тенденция увеличения среднего возраста чемпионов с удлинением дистанции: с 22 лет в беге на 100 м до 26 лет на дистанции 1500 м и до 31 года в соревнованиях по марафонскому бегу.

Двигательный потенциал человека интенсивно увеличивается в молодые годы, по большинству характеристик достигает максимума у лиц 25 летнего возраста и постепенно снижается к пожилому и старческому возрасту. До известной степени это может быть компенсировано тренировкой и приобретенным опытом, особенно в видах двигательной деятельности со сложной техникой и тактикой.

Созревание у детей проявляется, в частности, в их росте, то есть увеличении тотальных размеров и изменении пропорций тела. Увеличение размеров тела по-разному влияет на двигательные показатели. Одни из них (например, скорость бега, высота прыжка) не зависят от размеров тела, другие (относительная сила, величина МПК, приходящаяся на 1 кг веса тела) снижаются с увеличением тотальных размеров. Увеличение размеров тела у детей в процессе роста также должно было бы приводить к таким изменениям. У детей одного возраста, но с разными размерами тела зависимость спортивных результатов от длины тела, в принципе, такая же, как и у взрослых. Например, максимальная скорость бега не зависит от тотальных размеров тела. Однако есть и существенное различие. Большая длина тела нередко свидетельствует о более раннем созревании, в частности о наступлении полового созревания, что сопровождается очень большими перестройками в организме. Поэтому в 14 лет у мальчиков (возраст полового созревания) отмечается положительная зависимость между длиной тела и максимальной скоростью бега. В 7 и 18 лет такой зависимости нет, что находится в полном соответствии с динамикой онтогенетических изменений.

Длина тела или рост своими изменениями обусловлены возрастной перестройкой пропорций тела. Показатели моторики детей и подростков тоже могут при этом меняться. В качестве примера может служить то обстоятельство, что при одной и той же длине тела дети старшего возраста делают при беге шаги большей длины. Это объясняется тем, что у рослых детей в среднем более длинные ноги.

Двигательный возраст

При регистрации какой-либо двигательной характеристики у достаточно большой группы детей одного возраста и пола можно найти среднюю величину исследуемого параметра. Затем, зная результат исследования у отдельного ребенка, можно установить какому возрасту в среднем соответствует его результат. Таким способом определяют двигательный возраст детей и подростков. Например, в прыжках в высоту с места различным результатам соответствует следующий двигательный возраст (табл. 2).

Приведенные в таблице данные свидетельствуют о том, что результат 27,5 см показывают дети в среднем в 8 лет. Вместе с тем в этой возрастной группе встречаются дети, имеющие результат 19 см и дети, прыгающие на 36 см. Следовательно, не все дети одного и того же возраста показывают одинаковые результаты. Когда двигательный возраст опережает календарный, тогда этих детей называют акселератами. Детей, у которых двигательное развитие отстает, назы-

вают двигательными ретардантами. Например, если подросток в возрасте 14 лет прыгает в высоту с места на 32 см, он двигательный ретардант (в данном упражнении), а если его результат более 55 см – двигательный акселерат.

Таблица 2

Высота прыжка с места вверх у детей разного возраста, занимающихся футболом

Двигательный возраст, годы	Результат, см
8 лет	27,5±0,5
10 лет	30,0±0,8
12 лет	32,3±0,7
14 лет	41,6±0,5
16 лет	53,8±0,5
18 лет	55,2±0,6

Необходимо иметь в виду, что акселераты в одних двигательных заданиях могут быть ретардантами в других. Например, ребенок может опережать своих сверстников в упражнениях на быстроту и в тоже время отставать в упражнениях, требующих выносливости или гибкости. Существование акселератов и ретардантов легко объяснить. Дело в том, что темпы развития двигательных возможностей суще-

торики;

- изучение наследственных влияний;
- изучение темпов прироста показателей в ключевых двигательных тестах (заданиях).

Исследования включают изучение наследственных влияний (спортивных семей, близнецов и т. д.), а также проводят лонгитудинальные (то есть длительные, на протяжении ряда лет) наблюдения за показателями моторики детей.

Возраст, когда осуществляется прогнозирование, называют ювенильным. Показатели, регистрируемые в этот возрастной период, тоже называются ювенильными, в отличие от дефинитивных, которые регистрируют в возрасте, для которого делается прогноз. Например, значение показателей в детском возрасте называют ювенильными, а во взрослом – дефинитивными. Мерой прогностической информативности показателей моторики является коэффициент корреляции между значениями ювенильных и дефинитивных показателей. Наиболее уверенный прогноз дают показатели моторики, измеренные в препубертатном возрасте (в среднем в 7-8 лет). В период полового созревания прогностическая информативность снижена, что связано с происходящими в организме изменениями (табл. 3).

Таблица 3

Сводная таблица результатов тестирования юных футболистов 9-15-летнего возраста (средние данные по группам)

Показатели	15 лет	14 лет	13 лет	12 лет	11 лет	10 лет	9 лет
Рост, см	166,8	159,5	151,0	146,8	138,4	135,0	129,0
Масса тела, кг	54,6	45,7	41,16	36,1	32,1	29,9	26,1
Верт. прыжок	40,1	41,6	35,58	32,3	29,8	28,0	25,6
Темп (бег)	46,0	52,6	47,3	46,5	46,7	43,9	41,9
30 м с места	4,3	4,4	4,71	5,01	5,2	5,2	5,7
30 м с хода		3,9	4,10	4,1	4,5	4,7	5,3
Скорость реакции (мс)	2,9	2,9	3,2	3,1	3,9	3,8	4,2
Теплинг тест	105,9	122,4	101,6	93,6	87,7	83,4	75,5
Бег (30 м)		0,5	0,61	0,54	0,70	0,48	0,48

ственно зависят не только от генетически обусловленных индивидуальных особенностей, но и от условий жизни: они замедляются при болезни, травме или недостаточном питании. И, наоборот, при специализированной тренировке наблюдается ускорение развития.

Прогноз развития моторика человека

Часто возникает вопрос о том, каковы будут двигательные возможности человека спустя несколько лет, например, ребенка, когда он станет взрослым. Для ответа на этот вопрос проводят научные исследования в нескольких основных направлениях:

- изучение стабильности показателей мо-

При достижении возраста 17-18 лет она снова возрастает, приближаясь к максимальному значению, равному надежности (стабильности теста).

При проведении прогноза на основе темпов годового прироста показателя можно рассчитать этот прирост на основе уравнения регрессии. Расчеты показывают, что с возрастом прирост высоты прыжка с места увеличивается у юных футболистов в среднем на 2,7 см в год (на основе регрессионного уравнения вида: $Y = 2,73x + 5,97$), при уровне достоверности презентации данных $R^2 = 0,950$.

На основе уравнения регрессии вида $Y = -0,2234x + 7,386$ можно по данным возраста предсказать результат в беге с места (ожидаемый результат), надежность аппроксимации данных –

$R^2 = 0,955$. Минус в уравнении указывает на то, что с возрастом происходит закономерное снижение времени пробегания дистанции в среднем на 0,223 секунды в год (рис. 59).

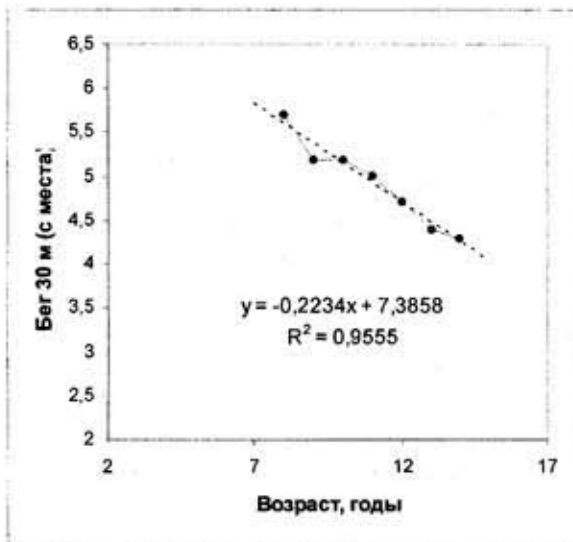


Рис. 59. Регрессионное соотношение результата бега на 30 м с места и возраста юных футболистов

Исследования показывают, что стабильность разных двигательных показателей неодинакова. В частности, довольно стабильными являются показатели, связанные с выносливостью. Так Н.Ж. Булгакова приводит следующие коэффициенты стабильности результатов в плавании на разные дистанции:

- 50 м – коэффициент стабильности равен 0,444;
- 100 м – коэффициент – 0,542;
- 200 м – коэффициент – 0,622;
- 400 м – коэффициент – 0,633;
- 800 м – коэффициент – 0,851.

В качестве ювенильного показателя использовались результаты детей в 7-летнем возрасте, а в качестве дефинитивного – данные тех же пловцов в 16 лет. Из данного сравнения видно, что чем длиннее дистанция, тем стабильнее показатели (выше коэффициент корреляции между характеристиками).

Интересна возрастная динамика времени двигательной реакции. При компьютерном тестировании выявлено уменьшение времени реакции с возрастом у юных футболистов (рис. 60).

Из уравнения регрессии видно, что можно в среднем прогнозировать повышение скорости реакции на сигнал на 23 мс в год.

Другой аспект прогнозирования развития двигательных способностей это изучение наследственных влияний. Их проводят разными методами. Основным из них является изучение близнецов. Сравнивая результаты идентичных и неидентичных пар близнецов, можно определить, в какой степени тот или иной признак находится под генетическим кон-

тролем. Интересно заметить, что нередко у идентичных близнецов даже процесс обучения движениям проходит очень сходным образом.

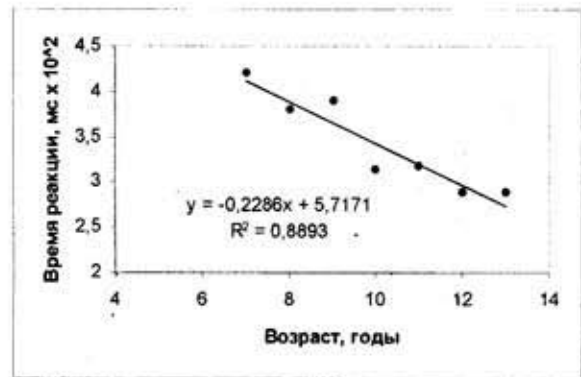


Рис. 60. Регрессионное соотношение времени простой реакции (компьютерный тест) и возраста юных футболистов

Результаты исследования онтогенеза моторики человека, выполненные с позиций эволюционного подхода, позволяют сформулировать закон системно-структурной гетерохронии развития движений человека. Его суть заключается в отражении комплекса филогенетически обусловленных свойств индивидуальной эволюции моторики, определяющих гармонию ритма возрастных преобразований физического потенциала человека и ее огромную роль в индивидуальной эволюции этого потенциала человека. На этой основе выдвигается принцип адекватности педагогического воздействия. Он означает необходимость такой организации обучающих и тренирующих воздействий, которая учитывает готовность систем организма человека к восприятию обучающей и тренирующей информации определенного типа. В этом случае акценты тренирующих воздействий должны совпадать по характеру с естественными ускорениями в развитии отдельных элементов и структур моторики, хорошо обеспеченными созреванием соответствующих морфологических и функциональных элементов и структур.

Принцип детерминации означает необходимость учета в процессе физической подготовки консервативных (генетически стабильных) и лабильных компонентов морфофункциональной организации человека и ее развития в ходе реализации физической активности. Консервативные признаки морфофункционального комплекса моторики должны быть главными объектами внимания при спортивной ориентации, при разработке многолетних программ физического совершенствования человека. Лабильные признаки должны оцениваться с точки зрения возможностей и оптимумов их развития, необходимости и достаточности уровня развития физического потенциала на разных этапах жизни, способности индивидуума надежно усваивать обучающую (тренирующую) информацию.

Резюме

Развитие моторики ребенка осуществляется как сплав биологического развития и социального научения. Все это фокусируется в трех главных факторах развития движений:

- генетически обусловленной «программе» развития двигательной функции и обеспечивающих ее реализацию морфологических и функциональных системах;
- спонтанной двигательной активности, стихийно реализуемой в жизненно необходимых локомоциях, а также трудовой, учебной и игровой деятельности;
- организованных и самостоятельных формах физического воспитания и спортивной подготовки.

Для контроля развития моторики в разные возрастные периоды определяют двигательный возраст, который представляет собой нормативные величины двигательных заданий, как средние величины, полученные на значительной группе детей конкретного возраста.

Дети, опережающие своих сверстников в данном двигательном задании называются акселератами, а те, кто отстает – ретардантами.

Прогноз развития моторики ребенка строится на изучении его наследственности, анализе темпов прироста показателей двигательных или других качеств, а также путем сравнения показателей моторики, полученных в детском (ювенильном) и юношеском (дифинитивном) возрастах.

Вопросы для повторения и закрепления материала главы

1. Как связаны двигательные возможности человека с его возрастом?
2. Как взаимодействуют созревание и научение в разные периоды возрастного развития?
3. Что такое двигательный возраст и как его определяют?
4. В чем состоит отличие двигательной акселерации и ретардации?
5. Какие периоды в жизни человека называют сенситивными?
6. Почему в разных видах спорта существует возрастной диапазон, в котором спортсмены чаще добиваются выдающихся результатов?
7. Развитие моторики и возможности ее прогноза.
8. Способы прогноза возрастного развития двигательных качеств в спорте.
9. О чем может свидетельствовать высокая величина коэффициента корреляции между ювенильными и дифинитивными значениями двигательных показателей?

Глава 14. Основы биомеханического контроля

Количественная оценка технико-тактического мастерства

Техническая подготовленность (двигательная культура, техническое мастерство) человека характеризуется тем, что умеет делать спортсмен и как он владеет освоенными действиями.

В первую группу показателей входят:

1. объем;
2. разносторонность;
3. рациональность технических действий.

Во вторую:

1. эффективность;
2. освоенность выполнения.

Весь набор технических приемов, которыми владеет спортсмен, называют объемом техники его двигательных действий в данном конкретном виде спорта. При этом технику спортивных движений оценивают на основе факта исполнения (выполнил – не выполнил, умеет – не умеет). Проведение детального анализа позволяет выделить общий и соревновательный объем технической подготовки. Общий объем характеризуется суммарным количеством технических действий, которые в целом освоены данным спортсменом. Соревновательный объем спортивной техники, представляет собой число различных технических действий, которые спортсмен способен использовать в условиях соревнований. Так, например, в спортивных единоборствах (дзюдо, самбо) спортсмен изучает сотни приемов, которые составляют общий объем, однако в условиях соревнований использует лишь несколько эффективных технических действий, относящихся к его соревновательному объему. Данное соотношение, конечно, не означает, что квалифицированные борцы умеют выполнять только эти действия, однако в решающих поединках они отдают предпочтение лишь наиболее эффективным, «ключевым» приемам. Сходная картина наблюдается и в «эстетических» видах спорта, например, в гимнастике и акробатике, где велик технический арсенал, формирующий культуру движений или «школу».

Другим показателем спортивно-технической подготовленности является *разносторонность* техники движений спортсмена. Она характеризуется степенью разнообразия двигательных действий, которыми владеет данный человек или которые он применяет в своей спортивной деятельности. Соответственно и здесь выделяют общую или соревновательную разносторонность. Техническая «база данных» каждого вида спорта

состоит из групп элементов. Например, техника греко-римской борьбы включает в себя приемы борьбы в стойке и в партере, а наборы технических действий гимнаста состоят из элементов и их комбинаций, выполняемых на различных снарядах. Следовательно, техника движений называется разносторонней, если в ее объеме в равной мере представлены технические приемы из различных групп технического арсенала.

Объем и разносторонность технической подготовки спортсменов является важным показателем мастерства спортсменов, особенно в тех видах, где имеется большой набор технических действий (единоборства, спортивные игры, спортивная и художественная гимнастика, акробатика и др.).

В биомеханике оценивают способ выполнения двигательных действий. Он может быть более или менее рациональным. Рациональность технических действий связана с возможностью достичь на их основе высших спортивных результатов. История каждого вида спорта имеет примеры смены одних технических приемов другими, как правило, более рациональными. Например, сейчас редко используется способ прыжка в высоту «ножницами» (только при начальном обучении), при прыжках в длину с разбега – способ «согнув ноги», большой оборот на перекладине с сохранением прогнутого положения тела на протяжении всего выполнения элемента – в гимнастике, выраженное сгибание ног в тазобедренных суставах с подтягиванием бедер к туловищу – в плавании брассом. Эти технические приемы или совсем исчезли из практики спорта, либо используются только при начальном обучении спортсменов, а также при организации массовых занятий физкультурой и спортом.

К рациональным вариантам техники, как к эталонам, стремятся при обучении начинающих. Например, начинающим лыжникам рассказывают, какие способы бега на лыжах целесообразно применить на равнинных участках трассы, а какие – на подъемах различной крутизны.

Три показателя технической подготовленности спортсмена, рассмотренные выше (объем, разносторонность и рациональность технических действий), говорят лишь о том, что умеет выполнять спортсмен. Но они не отражают качества исполнения технических действий (как спортсмен выполняет движения, насколько хорошо он владеет ими). Двигательное мастерство в этой связи необходимо оценивать по степени освоения техники движений. *Освоенностью техники двигательных действий* называется их стабильность в стандартных условиях и устойчивость

при применении в усложненных условиях соревновательной борьбы.

Освоенность количественно можно оценить по снижению эффективности реализации техники в усложненных условиях по сравнению с условиями комфорта. Техническое действие может быть освоено в разной степени спортсменом. Освоенность двигательного действия является сравнительно независимой характеристикой от эффективности техники (степени близости ее к наиболее рациональному варианту). Спортсмен может хорошо освоить то или иное двигательное действие, но с существенными ошибками в технике (его техника в этом случае будет неэффективна) и, наоборот, буквально с первых попыток выполняет движение правильно, хотя и недостаточно хорошо освоив его. Он может быстро забыть правильное выполнение и уже на следующем занятии быть не в состоянии повторить свои первые правильные попытки.

Следует заметить, что не случайно, в связи с разной степенью владения движением, были введены понятия о двигательных умениях и навыках.

Двигательное умение – это приобретенная способность выполнить движение. Что касается двигательного навыка, то его можно определить как достаточно хорошо освоенное двигательное умение. В данном пособии уместно и достаточно привести только биомеханическую характеристику освоенности движений, и в том числе тех ее сторон, которые имеют наиболее существенное значение для улучшения спортивно-технического мастерства спортсмена.

Для движений, освоенных на уровне навыка характерны:

- стабильность спортивного результата и ряда двигательных характеристик при выполнении движения в стандартных условиях;
- устойчивость (сравнительно малая изменчивость) результата при выполнении движения в изменяющихся, часто в усложненных условиях;
- сохранение техники движений при перерывах в обучении и тренировке;
- автоматизированность выполнения.

Для контроля за рациональностью и эффективностью спортивной техники и двигательными качествами человека необходимо выполнять измерения. *Измерением* (в широком смысле слова) называют установление соответствия между изучаемым явлением, с одной стороны и числами, с другой.

Всем известны и понятны наиболее простые разновидности измерений, например измерение длины прыжка или массы тела. Однако как измерить (и можно ли измерить) уровень знаний, степень утомления, выразительность движений, тех-

ническое мастерство? Кажется, что это не измеряемые явления. Однако ведь в каждом из этих случаев можно установить отношение «больше – равно – меньше» и говорить, что спортсмен А владеет техникой лучше спортсмена Б, а техника у Б лучше, чем у В, и т. д. Можно использовать вместо слов числа. Например, вместо слов «удовлетворительно», «хорошо», «отлично» – числа «3», «4», «5». В спорте довольно часто приходится выражать в числах, казалось бы, неизмеряемые показатели. Например, на соревнованиях по фигурному катанию на коньках техническое мастерство и артистичность выражается в числах судейских оценок. В широком смысле слова это все случаи измерения.

Точность измерений

Результат измерений всегда содержит погрешность, величина которой тем меньше, чем точнее метод измерений и измерительный прибор. В задачи биомеханических измерений входит не только нахождение измеряемой величины, но и оценка допущенной погрешности измерений. Абсолютной погрешностью называется величина $\Delta A = A - A_0$, равная разности между результатом измерения (A) и истинным значением измеряемой величины (A_0). Абсолютная погрешность измеряется в тех же единицах, что и сама измеряемая величина. За истинное значение измеряемой величины обычно принимают результат, полученный более точным методом. Например, при визуальной оценке темпа бега истинное его значение может быть найдено при помощи видеоманитофона. Для этого бег записывают на видеопленку, затем видеозапись воспроизводят и анализируют.

В практической работе часто удобнее пользоваться не абсолютной, а относительной величиной погрешности. Относительная погрешность измерения бывает двух видов: действительная и приведенная.

Действительной относительной погрешностью называется отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины:

$$A_d = (\Delta A / A_0) \cdot 100\%,$$

где ΔA – абсолютная погрешность, A_0 – истинное значение измеряемой величины.

Если известно максимально возможное или предельное значение измеряемой величины (A_m), то наряду с действительной может быть определена и приведенная относительная погрешность:

$$A_p = (A / A_m) \cdot 100\%,$$

где A_p – приведенная относительная погрешность, A_m – максимально возможное значение измеряемой характеристики.

Эту величину обычно указывают в технической документации измерительной аппаратуры и называют классом точности прибора. Например, если динамометр пригоден для измерения величины силы до 5000 Н и сила при этом измеряется с абсолютной погрешностью в 50 Н, то в паспорте к данному прибору указывается класс его точности, в данном случае 1%. Приведенная относительная погрешность (A_p), рассчитывается как $A_p = (50/5000) \times 100\%$. И в данном примере будет равна 1%. Таким образом, класс точности данного динамометра – 1,0%.

Погрешности измерения бывают систематическими и случайными. Систематической называется погрешность, величина которой не изменяется от измерения к измерению. Например, показания весов для измерения массы тела бывают завышены и занижены.

Из способов устранения систематической погрешности аппаратуры наиболее эффективным является тарировка измерительных приборов. *Тарировкой* называется нанесение шкалы во всем диапазоне возможных значений измеряемой величины. Например, при тарировке динамографической платформы на нее поочередно помещают грузы массой 10 кг, 20 кг, 30 кг и т. д. Возникающие при этом уровни электрического сигнала фиксируются на ленте регистрирующего прибора.

Помимо систематических погрешностей, результаты измерений искажаются случайными погрешностями. Случайные погрешности могут возникать из-за влияния разнообразных причин, которые невозможно точно учесть или предсказать заранее. Случайные погрешности принципиально неустранимы. Однако, воспользовавшись методами математической статистики, можно количественно оценить величину случайной погрешности и учесть ее, при объяснении результатов измерений.

Применение тестирования в биомеханике

В данном контексте английское слово *test* означает проба или испытание. Обычно под термином *тест* понимают измерение или испытание, проводимое с целью определения состояния или способностей спортсмена [В.Л. Уткин, 1989]. При этом подчеркивается, что не всякие измерения могут быть использованы как тесты, а только те, которые отвечают специальным требованиям. К ним относятся:

- 1) стандартность (процедура и условия тестирования должны быть одинаковыми во всех случаях применения теста);
- 2) наличие системы оценок;

- 3) надежность;
- 4) информативность.

Тесты, удовлетворяющие требованиям надежности и информативности, называют добротными или аутентичными.

Процесс испытаний называется *тестированием*; получаемое в итоге измерений числовое значение – *результатом тестирования* (или *результатом теста*). Например, бег 100 м – это тест, процедура проведения забегов и хронометража – тестирование, время бега – результат теста.

Тесты, в основе которых лежат двигательные задания, называют *двигательными* или *моторными*. Результатами их могут быть либо двигательные достижения (время прохождения дистанции, число повторений, пройденное расстояние и т. д.), либо физиологические и биомеханические показатели. В зависимости от этого, а также от задания, которое стоит перед исследуемым лицом, различают три группы двигательных тестов:

- 1) контрольные упражнения;
- 2) стандартные функциональные пробы;
- 3) максимальные функциональные пробы.

Иногда используют не один, а несколько тестов, имеющих единую конечную цель (например, оценку состояния спортсмена в соревновательный период тренировки). Такая группа тестов называется комплексом или батареей тестов.

Качественная оценка тестирования

Точность результатов тестирования оценивается на другой основе по сравнению с точностью измерений. При оценке точности измерения результат измерения сопоставляют с результатом, полученным более точным методом или прибором. При тестировании возможность сравнения полученных результатов с более точными методами чаще всего отсутствует. Поэтому приходится проверять не результаты тестирования, а качество теста. Проверку необходимо проводить еще до начала тестирования.

Качество теста зависит от его информативности и надежности. *Информативностью* является то, в какой степени тест пригоден для оценки интересующего процесса или явления (например, проявления двигательного качества, уровень технической подготовки и т. д.). Ранее информативность теста называли *валидностью* (от английского *valid* – действенный, имеющий силу). Различают содержательную (логическую) и эмпирическую (определяемую опытным путем) информативность.

Содержательная информативность определяется логическим (качественным) сопоставлением биомеханических, физиологических, психологических и других характеристик критерия и теста. Чаще всего логический метод определе-

ния информативности используется в видах спорта, где нет четкого количественного критерия. Например, в спортивных играх логический анализ фрагментов игры позволяет вначале сконструировать специфический тест, а затем проверить его информативность.

В большинстве случаев необходимо использовать методы определения эмпирической информативности, которые основаны на вычислении коэффициента информативности. Коэффициент информативности – это коэффициент корреляции (величина, показывающая степень взаимосвязи между изучаемыми параметрами) между данными тестирования и результатом измерения критерия информативности. Критерием информативности может служить:

- результат, показанный на спортивных соревнованиях;
- наиболее значимые элементы соревновательных упражнений;
- результаты тестов, информативность которых для спортсменов данной квалификации была установлена ранее;
- спортивная квалификация;
- экспертная оценка того качества, которое тестируется.

При биомеханическом контроле следует применять только те тесты, которые обладают высокой информативностью.

Для примера, рассмотрим прыжок «в шпагат» в художественной гимнастике. Качество прыжка оценивалось судьями-экспертами и в то же время измерялись биомеханические характеристики: сила отталкивания, длительность фазы полета и фазы опоры. Оказалось, что наибольшей информативностью обладает величина максимальной силы отталкивания: чем сильнее отталкиваются спортсменки, тем (в среднем) выше качество прыжка. Коэффициент информативности этого показателя равен 0,70. Такая величина информативности в теории тестирования рассматривается как удовлетворительная. Информативность того или иного теста может считаться

высокой, если коэффициент информативности равен или больше 0,85.

Надежность теста

Надежностью теста называется степень совпадения результатов при повторном тестировании одних и тех же людей в одинаковых условиях. Как информативность, так и надежность оценивается по величине коэффициента корреляции. В этом случае можно получить коэффициент надежности теста. В качестве последнего может служить коэффициент корреляции между двумя рядами результатов, полученных при первом и повторных тестированиях. Надежность считается:

- *отличной* если коэффициент надежности равен или более 0,95;
- *хорошей* – при величинах между 0,90-0,95;
- *удовлетворительной* – при 0,80-0,90.

Для проверки надежности тестирования проводят повторный тест – (ретест).

При анализе надежности теста выделяют две ее разновидности:

- воспроизводимость;
- объективность.

Методом повторного тестирования проверяется воспроизводимость результатов тестирования. Объективностью (согласованностью) теста называют степень независимости получаемых результатов от личных качеств человека, проводящего тестирование. Чем процедура тестирования проще, тем большая объективность тестирования может быть получена. И наоборот, объективность тестирования снижается при повышении требований к квалификации человека, проводящего тестирование.

Таким образом, тестирование в спорте и физической культуре служит для организации количественного контроля. При этом необходимо иметь в виду, что контроль должен быть комплексным на основе использования надежных и информативных тестов.

Резюме

Весь арсенал спортивных движений спортсмена представляет собой объем технических действий. Это то, что умеет выполнять спортсмен. При этом это техника может быть в большей или меньшей степени разносторонней. Рациональность техники спортивных движений указывает на то, какой вариант ее используется – современный или устаревший.

Кроме рассмотрения того, что технически умеет спортсмен, как разнообразен его технический арсенал, важно анализировать то, как владеет он спортивной техникой.

Для решения последней задачи изучается эффективность владения спортивной техникой и степень ее освоенности.

Для объективного контроля за технической подготовленностью спортсмена необходима система измерений и оценки двигательных характеристик. Для этого проводят измерение биомеханических характеристик. Сама процедура измерения будет называться тестированием, а испытание с целью получения этих показателей называется тестом. Тестирование будет эффективным, если подобраны надежные и информативные тесты или их комплексы.

Вопросы для повторения и закрепления материала главы

- 1) Анализ технической подготовки спортсмена.
- 2) Объем технической подготовленности.
- 3) Разносторонность освоения спортивных движений.
- 4) Рациональность технических действий.
- 5) Степень освоенности технических двигательных действий.
- 6) Эффективность владения спортивной техникой.
- 7) Абсолютная эффективность.
- 8) Сравнительная эффективность и эффективность реализации.
- 9) Основы теории тестирования в спортивной практике.
- 10) Надежность и информативность тестирования.
- 11) Проверка надежности теста.

Рекомендуемая литература

1. Александер, Р. Биомеханика [Текст]. - М.: Мир, 1970. - 339 с.
2. Анатомия человека [Текст] / под ред. В. И. Козлова. - М., 1978.
3. Бальсевич, В. К., Запорожанов, В. А. Обучение спортивным движениям [Текст]. - Киев, 1986.
4. Бергшоу, К. Мышечное сокращение [Текст]. - М.: Мир, 1985. - 128 с.
5. Бернштейн, Н. А. Очерки по физиологии движений и физиологии активности [Текст]. - М., 1966.
6. Гросс, Х. Х. Методология педагогической кинезиологии [Текст]. - Таллин, 1987.
7. Гурфинкель, В. С., Коц, Я. М. Регуляция позы человека [Текст]. - М., 1965.
8. Донской, Д. Д. Биомеханика физических упражнений [Текст]. - М., 1960.
9. Донской, Д. Д. Биомеханика [Текст]. - М., 1975.
10. Донской, Д. Д. Ходить и бегать для здоровья [Текст]. - М., 1985.
11. Донской, Д. Д., Зацюрский, В. М. Биомеханика [Текст]. - М., 1979. - 264 с.
12. Евсеев, С. П. Императивные тренажеры [Текст]. - СПб., 1991. - 127 с.
13. Жуков, Е. К., Котельников, Е. Г., Семенов, Д. А. Биомеханика физических упражнений [Текст]. - М., 1963.
14. Зацюрский, В. М., Аруин, А. С., Селуянов, В. Н. Биомеханика двигательного аппарата [Текст]. - М., 1981. - 143 с.
15. Коренберг, В. Б. Основы качественного биомеханического анализа [Текст]. - М.: ФиС, 1979. - 208 с.
16. Лапутин, А. Н. Обучение спортивным движениям [Текст]. - Киев, 1986.
17. Ломан В. Бег, прыжки, метания. [Текст]. - М., 1985.
18. Образцов, И. Ф., Адамович, И. С., Барер, А. С. Проблемы прочности в биомеханике [Текст]. - М.: Высш. шк., 1988. - 311 с.
19. Практикум по биомеханике [Текст] / под общ. ред. И. М. Козлова. - М., 1980.
20. Ратов, И. Л. Двигательные возможности человека (нетрадиционные методы их развития и восстановления) [Текст]. - Минск, 1994. - 90 с.
21. Сонькин, В. Д. Растем сильными и здоровыми [Текст]. - М., 1987.
22. Спортивная метрология [Текст] / под общ. ред. В. М. Зацюрского. - М., 1982.
23. Сучилин, Н. Г., Савельев, В. С., Попов, Г. И. Оптико-электронные методы измерения движений человека [Текст]. - М: Физкультура, образование, наука, 2000. - 127 с.
24. Уткин, В. Л. Биомеханика физических упражнений [Текст]. - М., Просвещение, 1989. - 206 с.
25. Петров, В. А., Гагин, Ю. А. Механика спортивных движений [Текст]. - М.: ФиС, 1974. - 232 с.
26. Эккерт, Р., Рэнделл, Д., Огастин, Дж. Физиология животных: Механизмы адаптации [Текст]. - М.: Мир, 1991. - 424 с.

Словарь терминов и сокращений

Актин – один из мажорных, сократительных белков мышечных клеток (широко распространен и в других типах клеток).

Анизометрический – от греч. anisos – неравный + metron – мера, длина.

Градуальное – от лат. gradus – шаг, ступень, степень. Прилагат. – постепенное.

Диссипация – от лат. dissipatio рассеивание. Переход энергии упорядоченного движения (например, энергии электрического тока) в энергию хаотического движения частиц (теплоту).

Дистантный – от лат. distantia – расстояние

Изо – приставка к составным терминам (isos) равный, одинаковый, подобный. Например, изометрический – «изо» – равный, «метр» – мера, длина.

Импульс – лат. impulsus – толчок к чему-либо, побуждение к совершению чего-либо. Импульс силы – произведение модуля силы на время ее действия

Кинематика – от греч. kinema (kinematos) движение – раздел механики, в котором движение тел рассматривается только с геометрической стороны, без учета их массы и сил, вызывающих само движение.

Контрактильный – от лат. contraction – стягивание, сжатие, сокращение.

Коррекция – от лат. correctio – исправление.

Корреляция – от лат. correlatio – соотношение. В математич. статистике – понятие, которым отмечают связь между явлениями, если одно из них входит в число причин, определяющих другие, или если имеются общие причины, воздействующие на эти явления (функция является частным случаем корреляции);

Миозин – мажорный белок сократительных волокон мышечной клетки.

Модуль – от лат. modulus – мера; название, даваемое какому-либо важному коэффициенту или величине.

Онтогенез – от греч. ontos – сущее + генез – индивидуальное развитие растений или животных.

Оптимум – от лат. optimum – наилучшее – совокупность наиболее благоприятных условий.

Рекуперация – от лат. recuperatio; получение обратно, возвращение.

Синергический – от греч. synergeia – сотрудничество, содружество, совместное действие.

Сенситивный – позднелат. Sinsitivus – чувствительный.

Статика – от греч. statos – стоящий. Раздел механики, в котором изучается равновесие тел при действии сил.

Тарирование – нем. Tariieren – 1) устарелое название градуировки измерительных приборов; 2) метод точного взвешивания на рычажных весах с применением для уравновешивания тела тарного груза (дробинки, куски металла и др.)

Флуктуации – от лат. fluctuatio – колебание. Случайное отклонение величины, характеризующей систему, от ее среднего значения

Эмерджентные – от англ. emergence возникновение, появление нового.

In vivo – от лат. vivus – живой, в живом организме, или прижизненно (об экспериментальной процедуре).

In vitro – означает в пробирке (вне организма).

In situ – от лат. – на месте нахождения.

ОБОЗНАЧЕНИЯ	3 стр.
ПРЕДИСЛОВИЕ	3 стр.
Глава 1. Предмет, задачи и методы биомеханики	4 стр.
Глава 2. История развития биомеханики	10 стр.
Глава 3. Кинематика и динамика движений человека	13 стр.
Глава 4. Динамика движений человека	19 стр.
Глава 5. Энергетика двигательной деятельности	30 стр.
Глава 6. Биомеханика двигательного аппарата человека	34 стр.
Глава 7. Движения вокруг осей	46 стр.
Глава 8. Сохранение и изменение положения тела	50 стр.
Глава 9. Общие основы наземных локомоций (биомеханика ходьбы, бега и прыжков)	55 стр.
Глава 10. Биомеханика перемещающих действий	60 стр.
Глава 11. Биомеханические основы двигательных качеств	66 стр.
Глава 12. Системы движений и организация управления	74 стр.
Глава 13. Возрастные изменения моторики	80 стр.
Глава 14. Основы биомеханического контроля	85 стр.
Рекомендуемая литература	90 стр.
Словарь терминов и сокращений	91 стр.

Учебное издание

Алексей Васильевич Муравьев
профессор, доктор биологических наук,

Антон Алексеевич Муравьев
кандидат биологических наук,

Евгений Николаевич Квасовец
доцент, кандидат биологических наук

Биомеханика физических упражнений

Учебное пособие

Редактор С.А.Викторова

Верстка и оформление - А.А.Муравьев

Подписано в печать 15.02.2007. Формат 60х92/8
Объем 8,2 п.л. Тираж 300. Заказ № 2758

Издательство

Ярославского государственного педагогического университета
имени К.Д. Ушинского (ЯГПУ)
150000, г. Ярославль, Республиканская ул., 108