

Уткин В.М.

**Биомеханика физических
упражнений.**

Москва - 1989

Часть первая

ОБЩАЯ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ БИОМЕХАНИКА

Изучение общей и дифференциальной биомеханики обеспечивает знание основных закономерностей строения двигательного аппарата, двигательных качеств и двигательной деятельности людей разного возраста. На этой основе базируется материал второго раздела, посвященного технике и тактике выполнения различных физических упражнений.

ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ В БИОМЕХАНИКУ

Первая наша задача состоит в том, чтобы заняться той великолепной машиной, которая нам близка,— человеческим организмом. Эта машина обладает роскошью механики — автоматизмом и быстротой включения. Ее ли не изучать? В человеческом организме есть мотор, “передача”, амортизаторы, есть тончайшие регуляторы и даже манометры. Все это требует изучения и использования. Должна быть особая наука — биомеханика. Эта наука может и не быть узко “трудо­вой”, она должна граничить со спортом, где движения сильны, ловки и в то же время воздушно легки, артистичны.

А. К. Гастев

Биомеханика — учение о двигательных возможностях и двигательной деятельности человека и животных.

Термин биомеханика составлен из двух греческих слов: *bios* — жизнь и *mechané* — орудие. Как известно, механика— это раздел физики, изучающий механическое движение и механическое взаимодействие материальных тел. Отсюда понятно, что биомеханика — это раздел науки, изучающий двигательные возможности и двигательную деятельность живых существ.

Наибольший практический интерес представляет изучение движений человека и высших животных. Первые научные труды здесь написаны Аристотелем (384—322 гг. до н. э.), которого интересовали закономерности движения наземных животных и человека. А основы наших знаний о движениях в воде заложены Архимедом (287—212 гг. до н. э.).

На становление биомеханики оказали влияние выдающиеся мыслители прошлого: римский врач Гален (131 — 201 гг.), Леонардо да Винчи (1452—1519 гг.), Микеланджело (1475—1564 гг.), Галилео Галилей (1564—1642 гг.), Исаак Ньютон (1642—1727 гг.), ученик Галилея Джованни Альфонсо Борелли (1608—1679 гг.)—автор первой книги по биомеханике “О движениях животных”, вышедшей в свет в 1679 г.

И. М. Сеченов (1829—1905 гг.), П. Ф. Лесгафт (1837— 1930 гг.), А. А. Ухтомский (1875—1942 гг.) и основоположник отечественной биомеханической школы Н. А. Бернштейн (1896—1966 гг.) много сделали для развития биомеханики труда и спорта. Кроме того, в последние десятилетия возникли и развиваются:

— инженерная биомеханика, основные достижения которой связаны с роботостроением;

— медицинская биомеханика, исследующая причины, последствия и способы профилактики травматизма, прочность опорно-двигательного аппарата, вопросы протезостроения;

— эргономическая биомеханика, изучающая взаимодействие человека с окружающими предметами с целью их оптимизации.

Но центральным разделом биомеханики остается биомеханика физических упражнений. Она изучает двигательную деятельность человека во время спортивных тренировок и соревнований и в процессе занятий массовыми и оздоровительными

формами физической культуры, в том числе на уроках физкультуры в школе. Непрерывно совершенствуясь, биомеханика физических упражнений постепенно преобразуется в биомеханику двигательной активности, охватывающую все стороны двигательной деятельности человека'.

“Здание” современной биомеханики состоит как бы из трех “секций” и трех “этажей” (рис. 1).

1 В дальнейшем биомеханику физических упражнений будем называть просто биомеханикой.

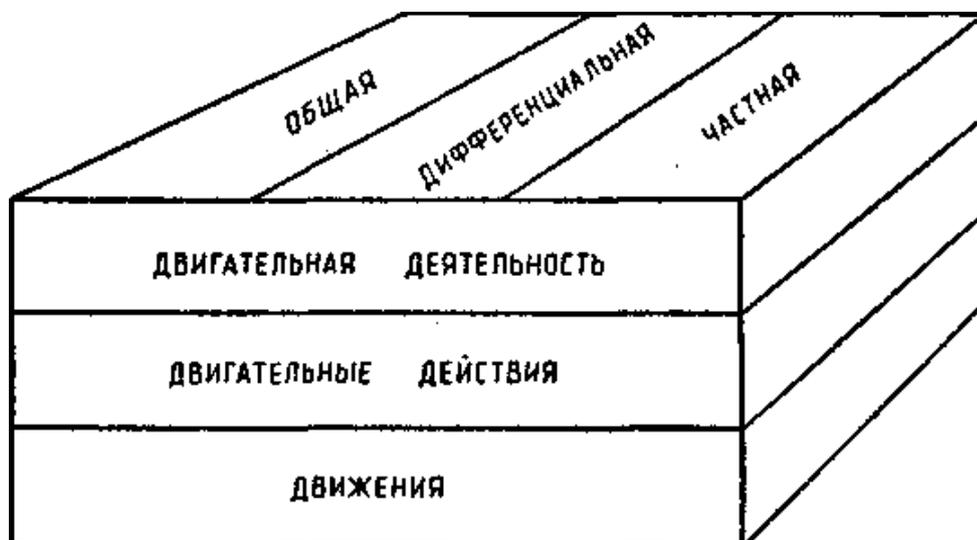


Рис. 1. Архитектоника современной биомеханики

Биомеханика делится на общую, дифференциальную и частную.

Общая биомеханика решает теоретические проблемы и помогает узнать, как и почему человек двигается. Этот раздел биомеханики очень важен для практики физического воспитания и спорта, ибо “нет ничего практичнее хорошей теории”.

Дифференциальная биомеханика изучает индивидуальные и групповые особенности двигательных возможностей и двигательной деятельности. Изучаются особенности, зависящие от возраста, пола, состояния здоровья, уровня физической подготовленности, спортивной квалификации и т. п.

Частная биомеханика рассматривает конкретные вопросы технической и тактической подготовки в отдельных видах спорта и разновидностях массовой физкультуры. В том числе в оздоровительном беге и ходьбе, общеразвивающих гимнастических упражнениях, ритмической гимнастике на суше (аэробика) и в воде (акваробика) и т. п. Основной вопрос частной биомеханики — как научить человека правильно выполнять разнообразные движения или как самостоятельно освоить культуру движений.

На трех “этажах” (уровнях) биомеханики изучают: движения — двигательные действия — двигательную деятельность. На первом уровне фактические данные для исследования движений добываются чаще всего в экспериментах с изолированными мышцами и другими частями тела животных.

За редким исключением (например, движения новорожденного) здоровый человек выполняет целенаправленные и мотивированные движения, или двигательные действия. На этом уровне биомеханика изучает и совершенствует технику двигательных действий (например, технику прыжка, удара, шага и т. д.).

Третий уровень биомеханики посвящен тактике двигательной деятельности. При выполнении физических упражнений двигательная деятельность складывается из

двигательных действий, как цепь из звеньев. Например, бег состоит из отдельных шагов; стрельба — из изготовления, прицеливания и выстрела; штрафной удар в футболе — из разбега и удара ногой по мячу. Двигательные действия в такой цепи взаимосвязаны и взаимообусловлены. Поэтому двигательная деятельность — это система двигательных действий.

Биомеханика занимает особое положение среди наук о физическом воспитании и спорте. Она базируется на анатомии, физиологии и фундаментальных научных дисциплинах — физике (механике), математике и теории управления. Взаимодействие биомеханики с биохимией, психологией и эстетикой дало жизнь новым научным направлениям, которые, едва родившись, уже приносят большую практическую пользу. В их числе “психобиомеханика”, энергетические и эстетические аспекты биомеханики.

Более других медико-биологических и педагогических дисциплин биомеханика использует достижения электронно-вычислительной техники.

Но главное — биомеханика служит связующим звеном между теорией и практикой физического воспитания, спорта и массовой физической культуры. Опираясь на знание биомеханики, педагогу легче учить своих воспитанников. Но для этого необходимо уметь анализировать двигательную деятельность, или, говоря на профессиональном языке, читать движения. Здесь можно провести аналогию с музыкой. Неспециалист воспринимает фонограмму музыкального произведения эмоционально. А профессионал-музыкант различает голоса разных инструментов, тонко оценивает согласованность их звучания, замечает ошибки и, кроме того, может “мысленно услышать” звуки, записанные на нотных линейках. Так и специалист по физическому воспитанию должен уметь “мысленно увидеть” движение, если зарегистрированы его характеристики (траектория, скорость, сила и т. д.).

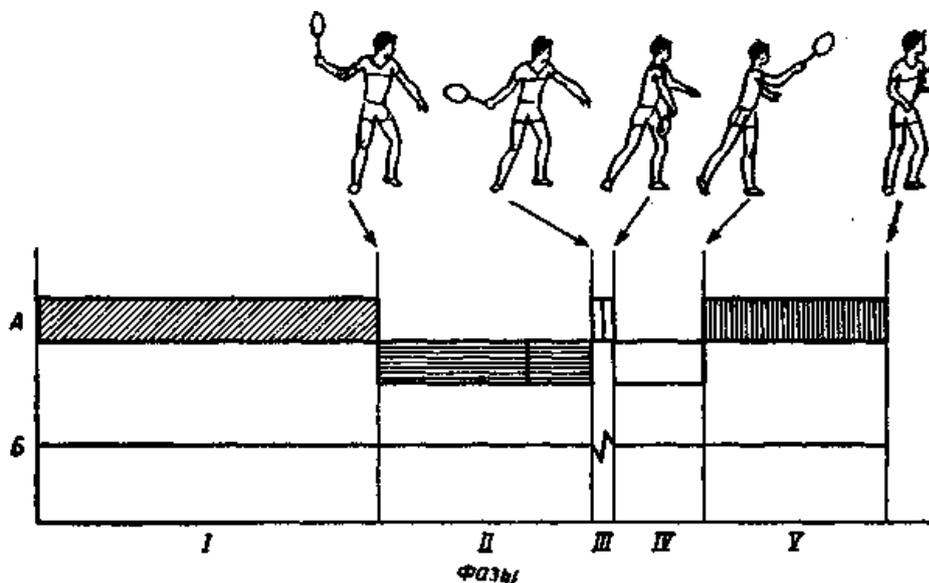


Рис. 2. Фазовый состав ударного действия в теннисе (по Л. С. Зайцевой) :

А — хронограмма; Б — тензометрическая отметка удара, I — фаза движения назад для замаха; II — фаза ускоренного движения ракетки вперед; III — фаза взаимодействия ракетки с мячом; IV — фаза замедленного движения ракетки вперед; V — фаза возвращения ракетки в исходное положение

Процедура анализа двигательной деятельности (биомеханического анализа) состоит из следующих этапов:

1. Изучение внешней картины двигательной деятельности. Прежде всего выясняют, из каких двигательных действий она состоит и в каком порядке действия следуют друг за другом. Например, школьный урок физической культуры состоит из ряда упражнений. Нужно учитывать, что характер, продолжительность и интенсивность предшествующих упражнений оказывают влияние на качество выполнения последующих.

Изучая внешнюю картину двигательной деятельности, регистрируют кинематические характеристики (см. в главе 3). Особенно важно знать продолжительность отдельных частей движения (фаз), графическим отображением чего является хронограмма. Хронограмма двигательного действия характеризует технику (рис. 2), а хронограмма двигательной деятельности — первое, на что обращают внимание при анализе спортивной тактики.

2. Выяснение причин, вызывающих и изменяющих движения. Они не доступны визуальному контролю, и для их анализа необходимо регистрировать динамические характеристики (см. в главе 3). Важнейшее значение здесь имеют величины сил, действующих на человека извне и создаваемых его собственными мышцами.

3. Определение топографии работающих мышц. На этом этапе выявляется, какие мышцы и как участвуют в выполнении данного упражнения. Зная, какие мышцы преимущественно обеспечивают двигательную деятельность, к которой готовит себя человек, можно из множества физических упражнений отобрать способствующие развитию именно этих мышц и их координации.

В зависимости от того, какая часть всей мышечной массы тела задействована, различают: глобальную мышечную работу (более $2/3$), регионарную (от $1/3$ до $2/3$) и локальную (менее $1/3$). Так, бегуны, пловцы, лыжники выполняют глобальную мышечную работу. К регионарной относится, например, мышечная работа, выполняемая при некоторых общеразвивающих гимнастических упражнениях (подтягивании на перекладине, поднимании ног и верхней части туловища из положения лежа на спине и т. п.).

Представление о том, какие мышцы задействованы в каждом упражнении, можно получить, регистрируя их электрическую активность. Чем интенсивнее работает мышца, тем выше ее электрическая активность и больше амплитуда электромиограммы.

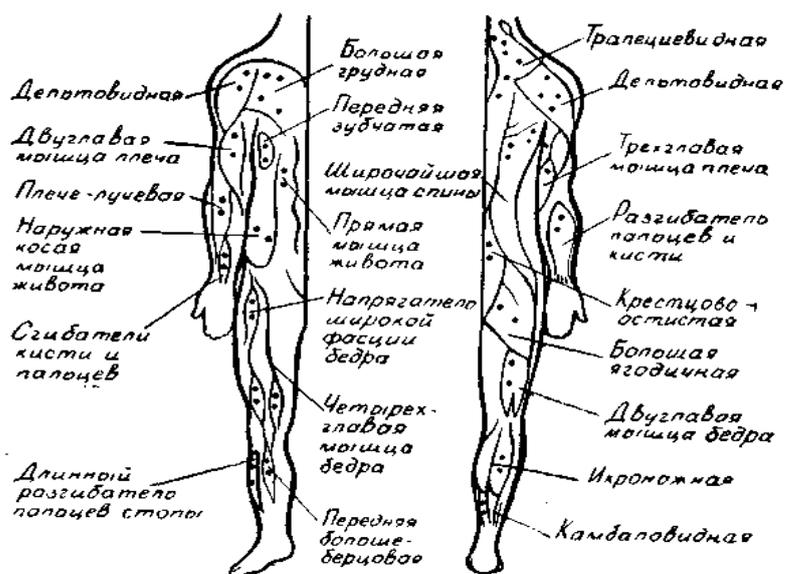


Рис. 3. Схематическое изображение мышц тела человека и мест наложения электромиографических электродов (по Вгоег, Каунсилмену, Барчаи, переработано)

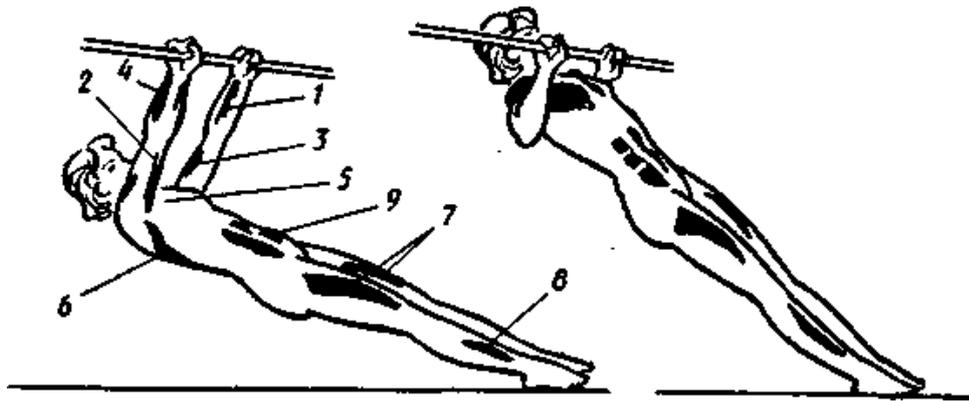


Рис. 4. Граничные позы при подтягивании в вися лежа на низкой перекладине (штриховкой обозначены наиболее активные мышцы):

1 — мышцы-сгибатели кисти; 2 — трехглавая м. плеча; 3 — двуглавая м. плеча; 4 — плечелучевая м.; 5 — большая грудная м.; 6 — широчайшая м. спины; 7 — четырехглавая м. бедра; 8 — мышцы-разгибатели стопы; 9 — прямая м. живота

На рис. 3 показаны места наложения электродов при записи электромиограммы, а на рис. 4 — пример графического изображения топографии работающих мышц.

Хорошо известно, что разные движения отличаются одно от другого по кинематике (внешней картине) и динамике (характеру силовых взаимодействий). Точно так же и электромиографический портрет движений неодинаков в разных упражнениях. Но, как пишет Р. С. Персон, “даже весьма сложные движения, если они достаточно автоматизированы (например, ходьба и другие локомоции, обычные бытовые, профессиональные и спортивные движения), имеют более или менее постоянный рисунок возбуждения мышц не только при повторении движения одним человеком, но и у разных людей” (Персон Р. С. Электромиография в исследованиях человека.— М., 1969.—С. 137).

4. Определение энергетических затрат и того, сколь целесообразно расходуется энергия работающих мышц. Для ответа на эти вопросы регистрируют энергетические характеристики (см. в главе 3). Наряду с величинами энергозатрат важна экономичность, которая тем выше, чем больше доля полезных энергозатрат по отношению ко всей затраченной энергии. Подсчитано, например, что у стайеров высшей квалификации повышение экономичности бега на 20% перемещает бегуна в списке лучших с 10-го на 1-е место.

5. Выявление оптимальных двигательных режимов (наилучшей техники двигательных действий и наилучшей тактики двигательной деятельности) осуществляется на заключительном этапе биомеханического анализа. Здесь же оценивается степень соответствия реально имеющихся место и оптимальных вариантов техники и тактики.

Оптимальным (от лат. *optimus* — наилучший) называется наилучший вариант из всех возможных. В спорте (а в последнее время и в оздоровительной физкультуре) постоянно идет поиск оптимальных вариантов техники и тактики и определение степени соответствия реально наблюдаемого двигательного режима оптимальному. Тем самым решается задача оптимизации двигательной деятельности или ее рационализации (если не удается достичь идеала, но можно к нему приблизиться).

Оптимизацией называют выбор наилучшего варианта из числа возможных. Но что такое наилучший вариант двигательной деятельности? Общего ответа на этот вопрос не существует, поскольку все зависит от конкретной ситуации и поставленной цели. Так, человек, спасающийся от преследователей, не думает о красоте и экономичности. Главное — бежать быстро. Другое дело, гимнастка, выполняющая вольные упражнения. Она

стремиться двигаться как можно красивее, в соответствии с эстетическими канонами своего вида спорта. В этих ситуациях различны цели людей. И потому неодинаковы критерии оптимальности, т. е. показатели, используемые для оценки степени достижения поставленной цели (рис. 5).

Экономичность двигательной деятельности обратно пропорциональна энергии, затрачиваемой на единицу выполняемой работы или метр пройденного пути. Это важнейший критерий оптимальности, и мы еще не раз к нему вернемся.

Механическая производительность тем выше, чем больший объем работы выполняется за определенное время или чем быстрее выполняется данный объем работы. Например, в циклических видах спорта механическая производительность оценивается временем преодоления соревновательной дистанции, а в массовой физической культуре — расстоянием, которое человек может пройти, пробежать или проплыть за 12 мин.

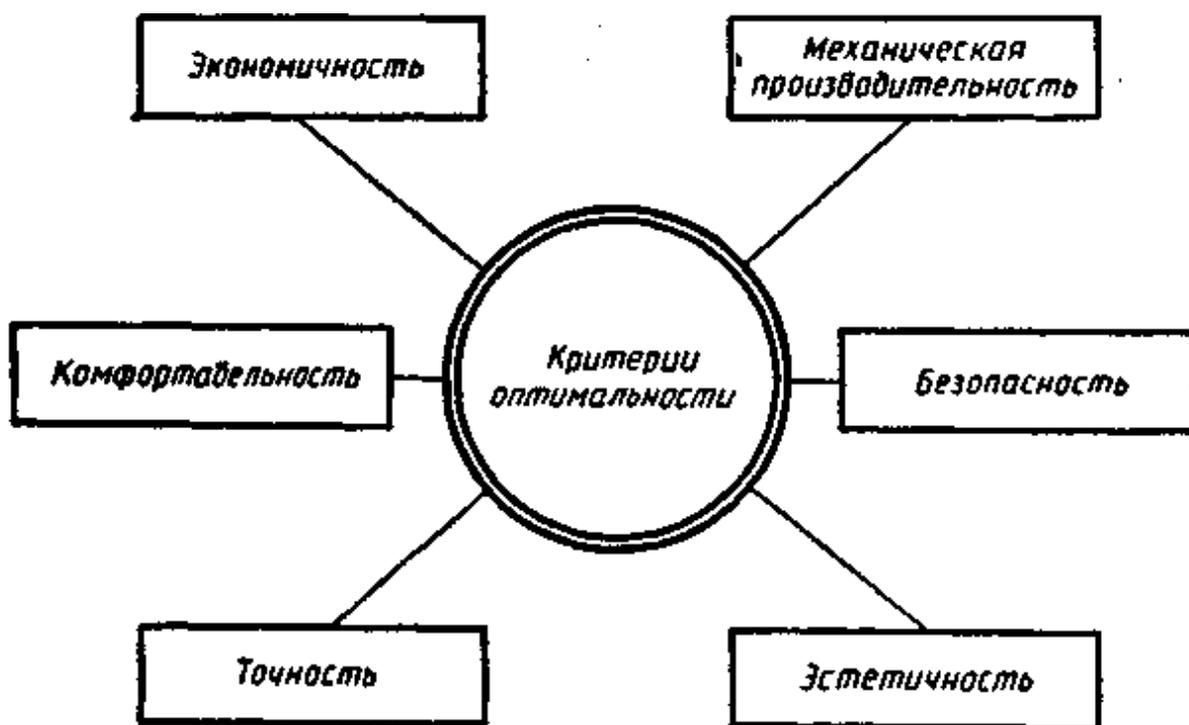


Рис. 5. Критерии оптимальности двигательной деятельности

Точность двигательных действий имеет две разновидности: целевая точность и точность воспроизведения заданной внешней картины движений (например, при выполнении “школы” в фигурном катании). Целевая точность оценивается отклонением точки попадания от центра мишени (например, в стрельбе) или отношением числа успешно выполненных двигательных действий к их общему числу (ударов в боксе и спортивных играх, бросков в борьбе, передач и приемов мяча и т. п.).

Эстетичность оценивается близостью кинематики (т. е. внешней картины движения) к эстетическому идеалу — общепринятому или принятому в данном виде спорта (фигурном катании, художественной гимнастике, синхронном плавании и т. п.).

Комфортабельными считаются плавные движения. Чем больше сотрясается тело при ходьбе, беге и т. п., тем ниже комфортабельность.

Безопасность тем выше, чем меньше вероятность травмы.

Трудоемкость биомеханического анализа и польза от него зависят от того, насколько педагог стремится разобраться в технике и тактике своих учеников. Различают системно-структурный и функциональный подходы к анализу двигательной деятельности.

Функциональный подход позволяет констатировать те или иные несовершенства техники и тактики. Например, на уроке физкультуры можно увидеть, что техника подтягивания у многих отличается от эталонной, рекомендованной в комплексе ГТО. Но как ее исправить? Функциональный подход не дает ответа на этот вопрос. На его знамени написано: овладеть процессом управления без полного раскрытия его внутренней природы. Понятно, что такой путь ненадежен. Не имея ясных рекомендаций для устранения недочетов в технике и тактике, преподаватель вынужден действовать наугад.

Системно-структурный подход дает более конкретные рекомендации. Педагог, применяющий при обучении своих учеников системно-структурный подход, стремится к познанию состава и структуры двигательной деятельности, т. е. к ответу на вопросы, из каких элементов она состоит и как они связаны между собой. Кроме того, выясняют внутренние механизмы, т. е. стремятся ответить на вопрос, почему двигательные действия выполнены именно так, а не иначе. Наиболее широко распространенным приемом системно-структурного подхода является выполняемое по определенным правилам разделение двигательного действия на части (“фазы”) (см. рис. 2). В главе 6 рассказывается об этих правилах.

Функциональный и системно-структурный подходы к анализу и совершенствованию двигательной деятельности дополняют друг друга. Применяя системно-структурный подход, педагог ведет анализ от сложного к простому. Элементы двигательной деятельности, находящиеся на нижней ступени иерархической лестницы, остаются нераскрытыми, недетализированными и рассматриваются уже с позиций функционального подхода. Уровень, на котором системно-структурный подход переходит в функциональный, зависит от решаемых задач.

Например, при тактической подготовке двигательные действия (технические элементы) считаются “неделимыми кирпичиками”, из которых складывается двигательная деятельность. А при технической подготовке детально изучается взаимодействие мышц, костей, суставно-связочного аппарата. Но по отношению к отдельным элементам двигательного аппарата применяется функциональный подход: их строение и функционирование на молекулярном уровне обычно не рассматриваются.

В современной биомеханике гармонично переплетаются идеи и методы оптимизации двигательной деятельности, функционального и системно-структурного подходов, автоматизированного контроля за технико-тактическим мастерством, моделирования техники и тактики на электронно-вычислительных машинах. Но главным остается мысль и труд исследователя, постигающего закономерности движений, и педагога, который использует эти достижения в учебном и тренировочном процессах.

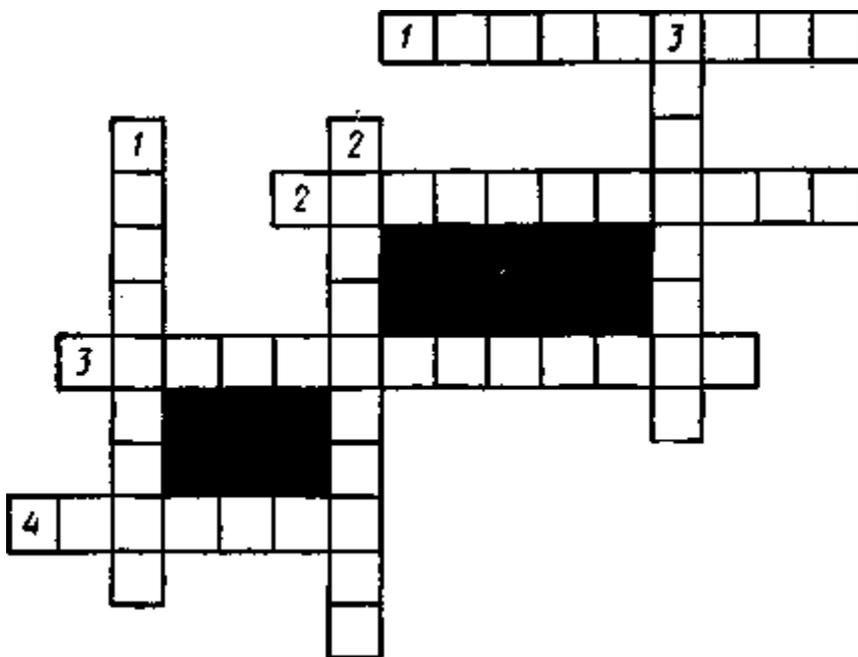


Рис. 6. Кроссворд.

По горизонтали: 1. Основоположник отечественной биомеханической школы. 2. Наука о двигательных возможностях и двигательной деятельности человека и животных. 3. Критерий оптимальности. 4. Автор первой книги по биомеханике.

По вертикали: 1. Способ взаимосвязи между элементами системы. 2. Раздел биомеханики, изучающий внешнюю картину движений. 3. Критерий оптимальности.

Контрольные вопросы

1. Что изучает биомеханика?
2. Каковы основные разделы биомеханики?
3. В чем различия между такими понятиями, как “движение”, “двигательное действие” и “двигательная деятельность”?
4. Перечислите основные этапы биомеханического анализа.
5. Что такое оптимизация двигательной деятельности?
6. Какие критерии оптимальности двигательной деятельности вам известны?
7. В чем заключается главное отличие функционального подхода от системно-структурного?
8. Что такое топография работающих мышц?
9. Приведите примеры ситуаций из практики физического воспитания и спорта, когда необходимо биомеханическое обоснование:
 - а) техники двигательных действий;
 - б) тактики двигательной деятельности.
10. Решите кроссворд (рис. 6).

ГЛАВА 2. ДВИГАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ ЧЕЛОВЕКА

Наука механика потому столь благородна
и полезна более всех прочих наук, что,
как оказывается, все живые существа,
имеющие способность к движению,
действуют по ее законам.

Леонардо да Винчи

Познай себя!

Двигательный аппарат человека — это самодвижущийся механизм, состоящий из 600 мышц, 200 костей, нескольких сотен сухожилий. Эти цифры приблизительны, поскольку некоторые кости (например, кости позвоночного столба, грудной клетки) срослись друг с другом, а многие мышцы имеют несколько головок (например, двуглавая мышца плеча, четырехглавая мышца бедра) или делятся на множество пучков (дельтовидная, большая грудная, прямая мышца живота, широчайшая мышца спины и многие другие). Считается, что двигательная деятельность человека сравнима по сложности с человеческим мозгом — самым совершенным созданием природы. И подобно тому как изучение мозга начинают с исследования его элементов (нейронов), так и в биомеханике прежде всего изучают свойства элементов двигательного аппарата.

Двигательный аппарат состоит из звеньев. Звенем называется часть тела, расположенная между двумя соседними суставами или между суставом и дистальным концом. Например, звеньями тела являются: кисть, предплечье, плечо, голова и т. д.

ГЕОМЕТРИЯ МАСС ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

Геометрией масс называется распределение масс между звеньями тела и внутри звеньев. Геометрия масс количественно описывается масс-инерционными характеристиками. Важнейшие из них — масса, радиус инерции, момент инерции и координаты центра масс.

Масса (m) — это количество вещества (в килограммах), содержащееся в теле или отдельном звене.

Вместе с тем масса — это количественная мера инертности тела по отношению к действующей на него силе. Чем больше масса, тем инертнее тело и тем труднее вывести его из состояния покоя или изменить его движение.

Массой определяются гравитационные свойства тела. Вес тела (в Ньютонах)

$$P = m \cdot g, \text{ где } g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \text{ — ускорение свободнопадающего тела.}$$

Масса характеризует инертность тела при поступательном движении. При вращении инертность зависит не только от массы, но и от того, как она распределена относительно оси вращения. Чем больше расстояние от звена до оси вращения, тем больше вклад этого звена в инертность тела. Количественной мерой инертности тела при вращательном движении служит момент инерции:

$$J = mR_{\text{ин}}^2,$$

где $R_{\text{ин}}$ — радиус инерции — среднее расстояние от оси вращения (например, от оси сустава) до материальных точек тела.

Центром масс называется точка, где пересекаются линии действия всех сил, приводящих тело к поступательному движению и не вызывающих вращения тела. В поле гравитации (когда действует сила тяжести) центр масс совпадает с центром тяжести. Центр тяжести — точка, к которой приложена равнодействующая сил тяжести всех частей тела. Положение общего центра масс тела определяется тем, где находятся центры масс отдельных звеньев. А это зависит от позы, т. е. от того, как части тела расположены друг относительно друга в пространстве.

В человеческом теле около 70 звеньев. Но столь подробного описания геометрии масс чаще всего и не требуется. Для решения большинства практических задач достаточно 15-звенной модели человеческого тела (рис. 7). Понятно, что в 15-звенной модели некоторые звенья состоят из нескольких элементарных звеньев. Поэтому такие укрупненные звенья правильнее называть сегментами.

Цифры на рис. 7 верны для “среднего человека”, они получены путем усреднения результатов исследования многих людей. Индивидуальные особенности человека, и в первую очередь масса и длина тела, влияют на геометрию масс.

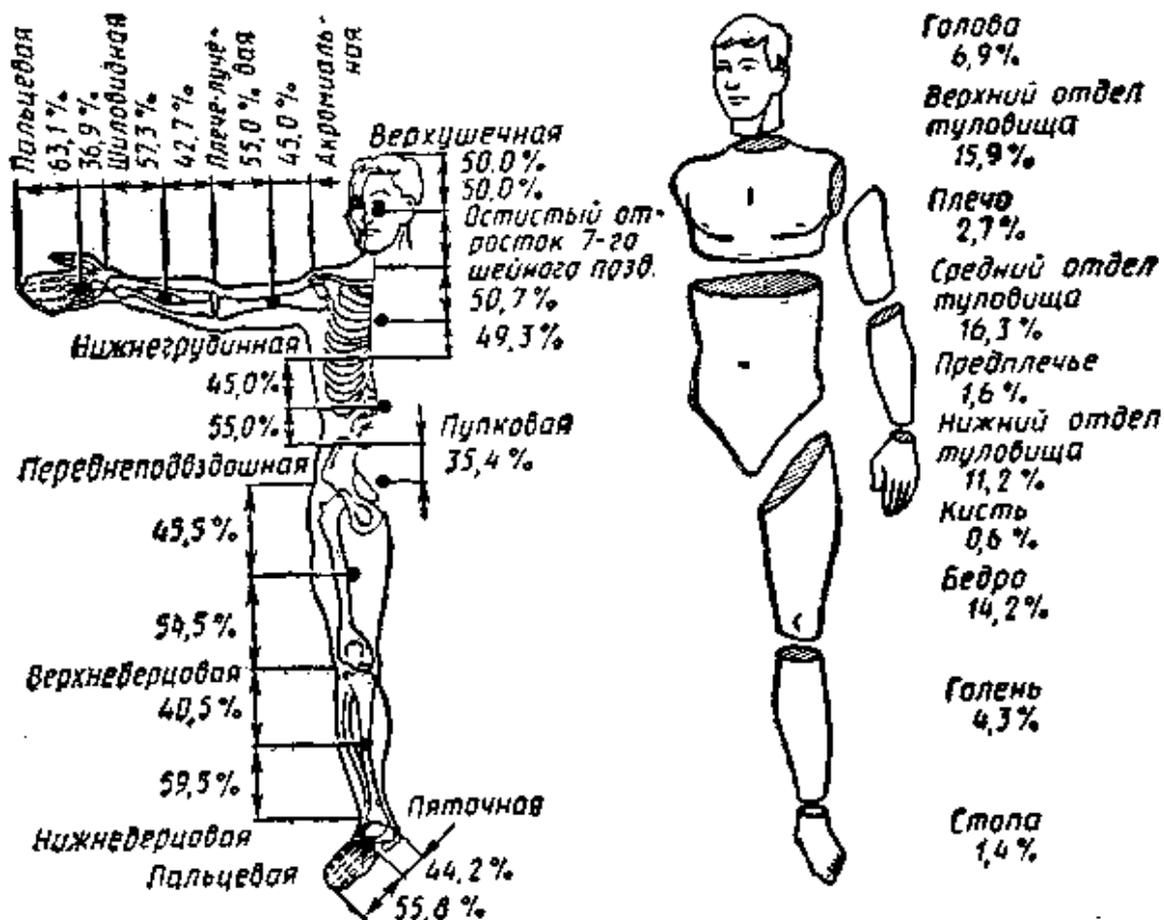


Рис. 7. 15 — звенная модель человеческого тела: справа — способ деления тела на сегменты и масса каждого сегмента (в % к массе тела); слева — места расположения центров масс сегментов (в % к длине сегмента)— см. табл. 1 (по В. М. Зацюрскому, А. С. Аруину, В. Н. Селуянову)

В. Н. Селуянов установил, что массы сегментов тела можно определить с помощью следующего уравнения:

$$m_x = B_0 + B_1 m + B_2 H,$$

где m_x — масса одного из сегментов тела (кг), например стопы, голени, бедра и т. д.; m — масса всего тела (кг); H — длина тела (см); B_0, B_1, B_2 — коэффициенты регрессионного уравнения, они различны для разных сегментов (табл. 1).

Примечание. Величины коэффициентов округлены и верны для взрослого мужчины.

Для того чтобы уяснить, как пользоваться таблицей 1 и другими подобными таблицами, вычислим, например, массу кисти человека, у которого масса тела равна 60 кг, а длина тела 170 см.

Таблица 1. Коэффициенты уравнения для вычисления массы сегментов тела по массе (т) и длине (Я) тела

Сегменты	Коэффициенты уравнения		
	B_0	B_1	B_2
Стопа	-0,83	0,008	0,007
Голень	-1,59	0,036	0,012
Бедро	-2,65	0,146	0,014
Кисть	-0,12	0,004	0,002
Предплечье	0,32	0,014	-0,001
Плечо	0,25	0,030	-0,003
Голова	1,30	0,017	0,014
Верхняя часть туловища	8,21	0,186	-0,058
Средняя часть туловища	7,18	0,223	-0,066
Нижняя часть туловища	-7,50	0,098	0,049

Масса кисти = $-0,12 + 0,004 \times 60 + 0,002 \times 170 = 0,46$ кг. Зная, каковы массы и моменты инерции звеньев тела и где расположены их центры масс, можно решить много важных практических задач. В том числе:

- определить количество движения, равное произведению массы тела на его линейную скорость ($m \cdot v$);
- определить кинетический момент, равный произведению момента инерции тела на угловую скорость (J_w); при этом нужно учитывать, что величины момента инерции относительно разных осей неодинаковы;
- оценить, легко или трудно управлять скоростью тела или отдельного звена;
- определить степень устойчивости тела и т. д.

Из этой формулы видно, что при вращательном движении относительно той же оси инертность человеческого тела зависит не только от массы, но и от позы. Приведем пример.

На рис. 8 изображена фигуристка, выполняющая вращение. На рис. 8, А спортсменка вращается быстро и делает около 10 оборотов в секунду. В позе, изображенной на рис. 8, Б, вращение резко замедляется и затем прекращается. Это происходит потому, что, отводя руки в стороны, фигуристка делает свое тело инертнее: хотя масса (m) остается той же, увеличивается радиус инерции ($R_{ин}$) и, следовательно, момент инерции.

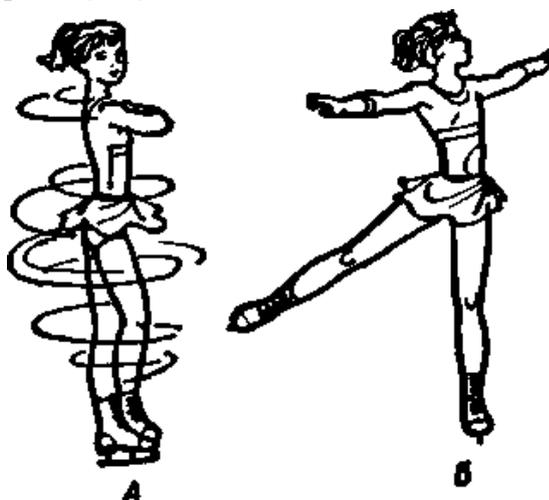


Рис. 8. Замедление вращения при изменении позы: А — меньшая; Б — большая величина радиуса инерции и момента инерции, который пропорционален квадрату радиуса инерции ($I = m \cdot R_{ин}^2$)

Еще одной иллюстрацией сказанному может быть шуточная задача: что тяжелее (точнее, инертнее)—килограмм железа или килограмм ваты? При поступательном движении их инертность одинакова. При круговом движении труднее перемещать вату. Ее материальные точки дальше отстоят от оси вращения, и поэтому момент инерции значительно больше.

ЗВЕНЬЯ ТЕЛА КАК РЫЧАГИ И МАЯТНИКИ

Биомеханические звенья представляют собой своеобразные рычаги и маятники.

Как известно, рычаги бывают первого рода (когда силы приложены по разные стороны от точки опоры) и второго рода. Пример рычага второго рода представлен на рис. 9, А: гравитационная сила (F_1) и противодействующая ей сила мышечной тяги (F_2) приложены по одну сторону от точки опоры, находящейся в данном случае в локтевом суставе. Подобных рычагов в теле человека большинство. Но есть и рычаги первого рода, например голова (рис. 9, Б) и таз в основной стойке.

Задание: найдите рычаг первого рода на рис. 9, А.

Рычаг находится в равновесии, если равны моменты противодействующих сил (см. рис. 9, А):

$$F_2 l_2 \cos \alpha = F_1 l_1,$$

F_2 — сила тяги двуглавой мышцы плеча; l_2 — короткое плечо рычага, равное расстоянию от места прикрепления сухожилия до оси вращения; α — угол между направлением действия силы и перпендикуляром к продольной оси предплечья.

Рычажное устройство двигательного аппарата дает человеку возможность выполнять дальние броски, сильные удары и т. п. Но ничто на свете даром не дается. Мы выигрываем в скорости и мощности движения ценой увеличения силы мышечного сокращения. Например, для того чтобы, сгибая руку в локтевом суставе, перемещать груз массой 1 кг (т. е. с силой тяжести 10 Н) так, как показано на рис. 9, Л, двуглавая мышца плеча должна развить силу 100—200 Н.

“Обмен” силы на скорость тем более выражен, чем больше соотношение плеч рычага. Проиллюстрируем это важное положение примером из гребли (рис. 10). Все точки весла-тела, движущегося вокруг оси, имеют одну и ту же угловую скорость

$$\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}.$$

Но их линейные скорости неодинаковы. Линейная скорость (v) тем выше, чем больше радиус вращения (r):

$$v = \omega \cdot r.$$

Следовательно, для увеличения скорости нужно увеличивать радиус вращения. Но тогда придется во столько же раз увеличить и силу, прикладываемую к веслу. Именно поэтому длинным веслом труднее грести, чем коротким, бросить тяжелый предмет на дальнюю дистанцию труднее, чем на близкую, и т. д. Об этом знал еще Архимед, руководивший обороной Сиракуз от римлян и изобретавший рычажные приспособления для метания камней.

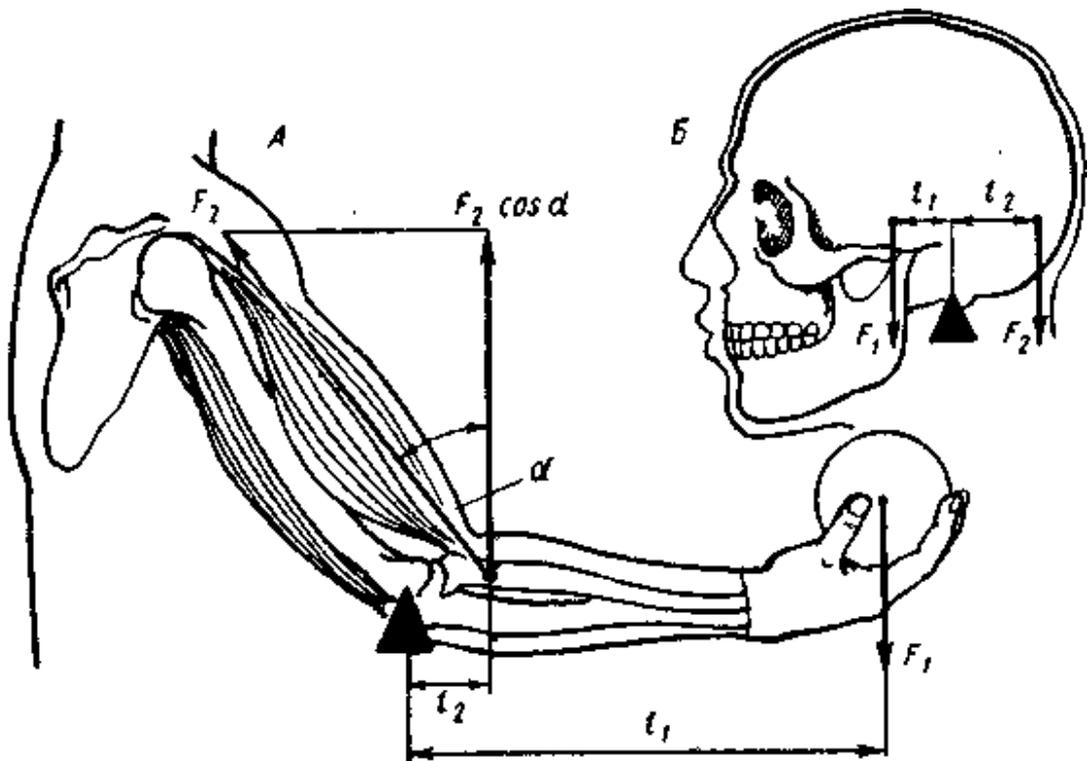


Рис. 9. Примеры рычагов тела человека:
 А — предплечье-рычаг второго рода; Б — голова-рычаг первого рода

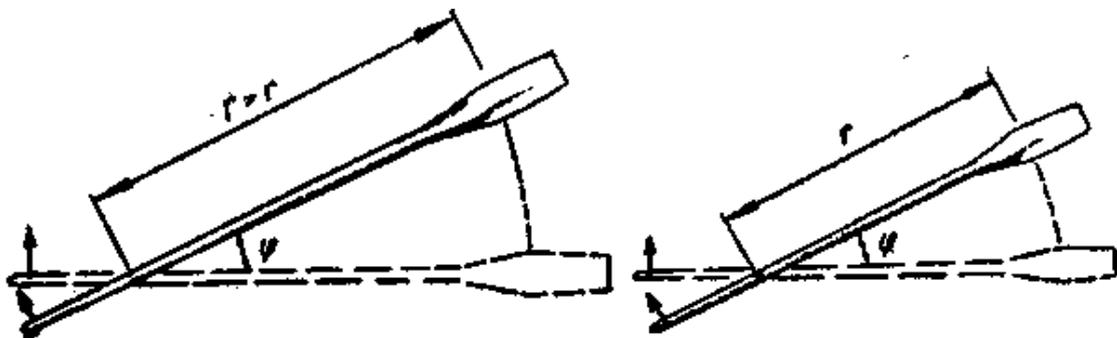


Рис. 10. При одинаковом угловом перемещении (φ) и угловой скорости $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ траектория (показана пунктиром) тем длиннее, прикладываемая к веслу сила (показана стрелками) тем больше и линейная скорость $V = \omega r$ тем выше, чем больше радиус вращения (r)

Руки и ноги человека могут совершать колебательные движения. Это делает наши конечности похожими на маятники. Наименьшие затраты энергии на перемещение конечностей имеют место, когда частота движений на 20—30% больше частоты собственных колебаний руки или ноги:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

где $(g=9,8 \text{ м/с}^2; l$ — длина маятника, равная расстоянию от точки подвеса до центра масс руки или ноги.

Эти 20—30% объясняются тем, что нога не является однозвенным цилиндром, а состоит из трех сегментов (бедро, голени и стопы). Обратите внимание: собственная частота колебаний не зависит от массы качающегося тела, но уменьшается при увеличении длины маятника.

Делая частоту шагов или гребков при ходьбе, беге, плавании и т. п. резонансной (т. е. близкой к собственной частоте колебаний руки или ноги), удастся минимизировать затраты энергии.

Замечено, что при наиболее экономичном сочетании частоты и длины шагов или гребков человек демонстрирует существенно повышенную физическую работоспособность. Это полезно учитывать не только при тренировке спортсменов, но и при проведении физкультурных занятий в школах и группах здоровья.

Любознательный читатель может спросить: чем объясняется высокая экономичность движений, выполняемых с резонансной частотой? Это происходит потому, что колебательные движения верхних и нижних конечностей сопровождаются рекуперацией механической энергии (от лат. recuperatio — получение вновь или повторное использование). Простейшая форма рекуперации — переход потенциальной энергии в кинетическую, затем снова в потенциальную и т. д. (рис. 11). При резонансной частоте движений такие преобразования осуществляются с минимальными потерями энергии. Это означает, что метаболическая энергия, однажды созданная в мышечных клетках и перешедшая в форму механической энергии, используется многократно — и в этом цикле движений, и в последующих. А если так, то потребность в притоке метаболической энергии уменьшается.

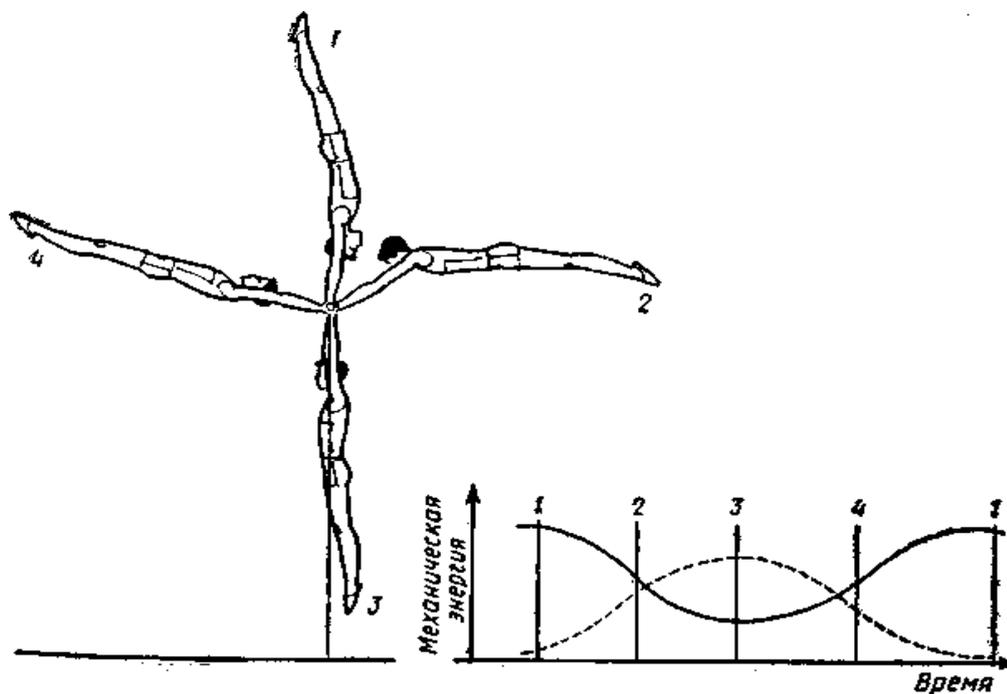


Рис. 11. Один из вариантов рекуперации энергии при циклических движениях: потенциальная энергия тела (сплошная линия) переходит в кинетическую (пунктир), которая вновь преобразуется в потенциальную и способствует переходу тела гимнаста в верхнее положение; цифры на графике соответствуют пронумерованным позам спортсмена

Благодаря рекуперации энергии выполнение циклических движений с темпом, близким к резонансной частоте колебаний конечностей,— эффективный способ сохранения и накопления энергии. Резонансные колебания способствуют концентрации энергии, и в мире неживой природы они иногда небезопасны. Например, известны случаи разрушения моста, когда по нему шло воинское подразделение, четко отбивая шаг. Поэтому по мосту положено идти не в ногу.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОСТЕЙ И СУСТАВОВ

Механические свойства костей определяются их разнообразными функциями; кроме двигательной, они выполняют защитную и опорную функции.

Кости черепа, грудной клетки и таза защищают внутренние органы. Опорную функцию костей выполняют кости конечностей и позвоночника.

Кости ног и рук продолговатые и трубчатые. Трубчатое строение костей обеспечивает противодействие значительным нагрузкам и вместе с тем в 2—2,5 раза снижает их массу и значительно уменьшает моменты инерции.

Различают четыре вида механического воздействия на кость: растяжение, сжатие, изгиб и кручение.

При растягивающей продольной силе кость выдерживает напряжение 150 Н/мм^2 . Это в 30 раз больше, чем давление, разрушающее кирпич. Установлено, что прочность кости на растяжение выше, чем у дуба, и почти равна прочности чугуна.

При сжатии прочность костей еще выше. Так, самая массивная кость— большеберцовая выдерживает вес 27 человек. Предельная сила сжатия составляет 16000—18000 Н.

При изгибе кости человека также выдерживают значительные нагрузки. Например, силы 12000 Н (1,2 т) недостаточно, чтобы сломать бедренную кость. Подобный вид деформации широко встречается и в повседневной жизни, и в спортивной практике. Например, сегменты верхней конечности деформируются на изгиб при удержании положения “крест” в висе на кольцах.

При движениях кости не только растягиваются, сжимаются и изгибаются, но также и скручиваются. Например, при ходьбе человека моменты скручивающих сил могут достигнуть 15 Нм. Эта величина в несколько раз меньше предела прочности костей. Действительно, для разрушения, например, большеберцовой кости момент скручивающей силы должен достигнуть 30—140 Нм (Сведения о величинах сил и моментов сил, приводящих к деформации костей, приблизительны, а цифры, по-видимому, занижены, поскольку получены преимущественно на трупном материале. Но и они свидетельствуют о многократном запасе прочности человеческого скелета. В некоторых странах практикуется прижизненное определение прочности костей. Такие исследования хорошо оплачиваются, но приводят к увечьям или гибели испытуемых и потому антигуманны).

Таблица 2. Величины силы, действующей на головку бедренной кости. (по Х. А. Янсону, 1975 г., переработано)

Вид двигательной деятельности	Величина силы (по Вид двигательной деятельности отношению к силе тяжести тела)
Сидение	0,08
Стояние на двух ногах	0,25
Стояние на одной ноге	2,00
Ходьба по ровной поверхности	1,66
Подъем и спуск по наклонной поверхности	2,08
Быстрая ходьба	3,58

Особенно велики допустимые механические нагрузки у спортсменов, потому что регулярные тренировки приводят к рабочей гипертрофии костей. Известно, что у штангистов утолщаются кости ног и позвоночника, у футболистов — внешняя часть кости плюсны, у теннисистов — кости предплечья и т. д.

Механические свойства суставов зависят от их строения. Суставная поверхность смачивается синовиальной жидкостью, которую, как в капсуле, хранит суставная сумка. Синовиальная жидкость обеспечивает уменьшение коэффициента трения в суставе примерно в 20 раз. Поразителен характер действия “выжимающейся” смазки, которая при снижении нагрузки на сустав поглощается губчатыми образованиями сустава, а при увеличении нагрузки выжимается для смачивания поверхности сустава и уменьшения коэффициента трения.

Действительно, величины сил, воздействующих на суставные поверхности, огромны и зависят от вида деятельности и ее интенсивности (табл. 2).

Примечание. Еще выше силы, действующие на коленный сустав; при массе тела 90 кг они достигают: при ходьбе 7000 Н, при беге 20000 Н.

Прочность суставов, как и прочность костей, небеспредельна. Так, давление в суставном хряще не должно превышать 350 Н/см^2 . При более высоком давлении прекращается смазка суставного хряща и увеличивается опасность его механического стирания. Это нужно учитывать в особенности при проведении туристических походов (когда человек несет тяжелый груз) и при организации оздоровительных занятий с людьми среднего и пожилого возраста. Ведь известно, что с возрастом смазывание суставной сумки становится менее обильным.

БИОМЕХАНИКА МЫШЦ

Скелетные мышцы являются основным источником механической энергии человеческого тела. Их можно сравнить с двигателем. На чем же основан принцип действия такого “живого двигателя”? Что приводит в действие мышцу и какие свойства она при этом проявляет? Как мышцы взаимодействуют между собой? И наконец, какие режимы функционирования мышц являются наилучшими? Ответы на эти вопросы вы найдете в настоящем разделе.

Биомеханические свойства мышц

К ним относятся сократимость, а также упругость, жесткость, прочность и релаксация.

Сократимость — это способность мышцы сокращаться при возбуждении. В результате сокращения происходит укорочение мышцы и возникает сила тяги.

Для рассказа о механических свойствах мышцы воспользуемся моделью (рис. 12), в которой соединительнотканые образования (параллельный упругий компонент) имеют механический аналог в виде пружины (1). К соединительнотканым образованиям относятся: оболочка мышечных волокон и их пучков, саркоlemma и фасции.

При сокращении мышцы образуются поперечные актино-миозиновые мостики, от числа которых зависит сила сокращения мышцы. Актинно-миозиновые мостики сократительного компонента изображаются на модели в виде цилиндра, в котором движется поршень (2).

Аналогом последовательного упругого компонента является пружина (3), последовательно соединенная с цилиндром. Она моделирует сухожилие и те миофибриллы (сократительные нити, составляющие мышцу), которые в данный момент не участвуют в сокращении.

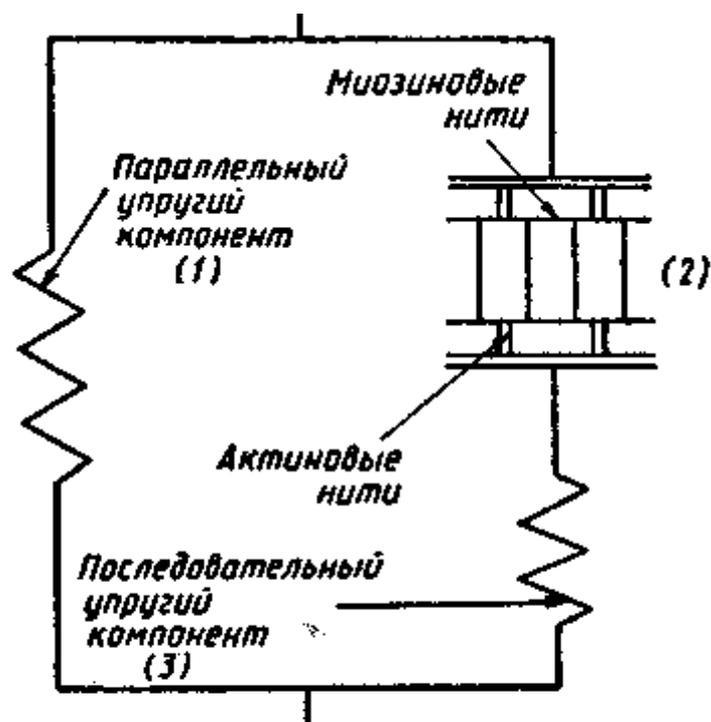


Рис. 12. Трехкомпонентная модель мышцы:

1 — параллельный упругий компонент; 2 — сократительный компонент; 3 — последовательный упругий компонент (по В. М. Зацiorsкому)

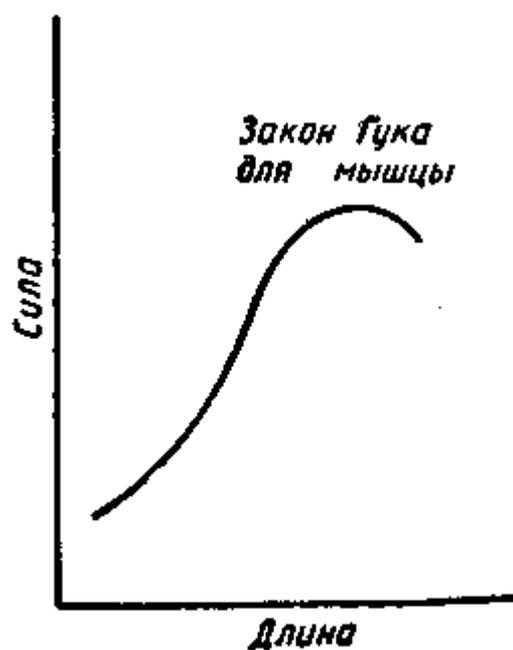


Рис. 13. Связь между силой тяги и длиной мышцы

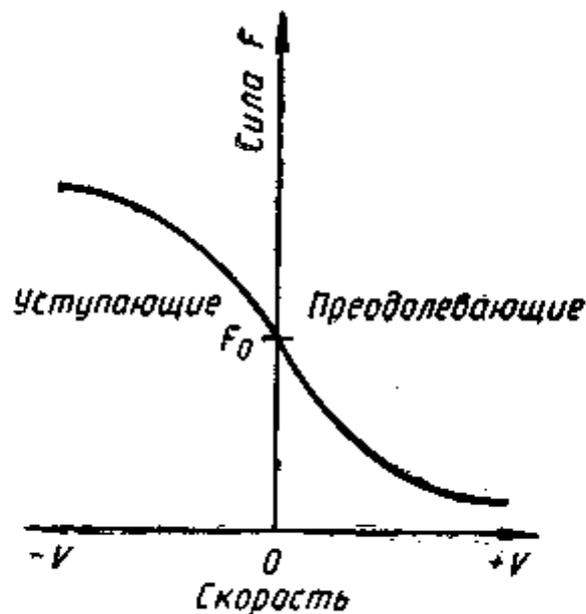


Рис. 14. Взаимосвязь между силой и скоростью мышечного сокращения (по А. Хиллу; Abbot)

Модель отображает упругие свойства мышцы, т. е. ее способность восстанавливать первоначальную длину после устранения деформирующей силы. Существование упругих свойств объясняется тем, что при растягивании в мышце возникает энергия упругой деформации. Здесь мышцу можно сравнить с пружиной или с резиновым жгутом: чем сильнее растянута пружина, тем большая энергия в ней запасена. Это явление широко используется в спортивной практике. Например, в хлесте предварительное растягивание мышц приводит к растягиванию и параллельного, и последовательного упругого компонента. В них запасается энергия упругой деформации, которая в финальной части движения (метания, толкания и т. д.) преобразуется в энергию движения (кинетическую энергию).

По закону Гука для мышцы ее удлинение нелинейно зависит от величины растягивающей силы (рис. 13). Эта кривая (ее называют “сила — длина”) является одной из характеристических зависимостей, описывающих закономерности мышечного сокращения. Другую характеристическую зависимость “сила — скорость” называют в честь изучавшего ее известного английского физиолога кривой Хилла (рис. 14) (Так принято сегодня называть эту важную зависимость. На самом деле А. Хилл изучал только преодолевающие движения (правую часть графика на рис. 14). Взаимосвязь между силой и скоростью при уступающих движениях впервые исследовал Abbot.).

По характеристическим кривым определяют жесткость и прочность мышцы.

Жесткость — это способность противодействовать прикладываемым силам. Коэффициент жесткости определяется как отношение приращения восстанавливающей силы к приращению длины мышцы под действием внешней силы:

$$K_{ж} = \frac{\Delta F}{\Delta l} \text{ (Н/м)}.$$

Величина, обратная жесткости, называется **податливостью** мышцы. Коэффициент податливости:

$$K_n = \frac{\Delta l}{\Delta F} \text{ м/Н}$$

— показывает, насколько удлинится мышца при изменении внешней силы на единицу. Например, податливость сгибателя предплечья близка к 1 мм/Н.

Прочность мышцы оценивается величиной растягивающей силы, при которой происходит разрыв мышцы. Предельное значение растягивающей силы определяется по кривой Хилла (см. рис. 14). Сила, при которой происходит разрыв мышцы (в пересчете на 1 мм² ее поперечного сечения), составляет от 0,1 до 0,3 Н/мм². Для сравнения: предел прочности сухожилия около 50 Н/мм², а фасций около 14 Н/мм². Возникает вопрос: почему иногда рвется сухожилие, а мышца остается целой? По-видимому, это может происходить при очень быстрых движениях: мышца успевает самортизировать, а сухожилие нет.

Релаксация — свойство мышцы, проявляющееся в постепенном уменьшении силы тяги при постоянной длине мышцы. Релаксация проявляется, например, при спрыгивании и прыжке вверх, если во время глубокого подседа человек делает паузу. Чем пауза длительнее, тем сила отталкивания и высота выпрыгивания меньше.

Режимы сокращения и разновидности работы мышц

Мышцы, прикрепленные сухожилиями к костям, функционируют в изометрическом и анизометрическом режимах (см. рис. 14).

При изометрическом (удерживающем) режиме длина мышцы не изменяется (от греч. “изо” — равный, “метр” — длина). Например, в режиме изометрического сокращения работают мышцы человека, который подтянулся и удерживает свое тело в этом положении. Аналогичные примеры: “крест Азаряна” на кольцах, удержание штанги и т. п.

На кривой Хилла изометрическому режиму соответствует величина статической силы (F_0), при которой скорость сокращения мышцы равна нулю.

Замечено, что статическая сила, проявляемая спортсменом в изометрическом режиме, зависит от режима предшествующей работы. Если мышца функционировала в уступающем режиме, то F_0 больше, чем в том случае, когда выполнялась преодолевающая работа. Именно поэтому, например, “крест Азаряна” легче выполнить, если спортсмен приходит в него из верхнего положения, а не из нижнего.

При анизометрическом сокращении мышца укорачивается или удлиняется. В анизометрическом режиме функционируют мышцы бегуна, пловца, велосипедиста и т. д.

У анизометрического режима две разновидности. В преодолевающем режиме мышца укорачивается в результате сокращения. А в уступающем режиме мышца растягивается внешней силой. Например, икроножная мышца спринтера функционирует в уступающем режиме при взаимодействии ноги с опорой в фазе амортизации, а в преодолевающем режиме — в фазе отталкивания.

Правая часть кривой Хилла (см. рис. 14) отображает закономерности преодолевающей работы, при которой возрастание скорости сокращения мышцы вызывает уменьшение силы тяги. А в уступающем режиме наблюдается обратная картина: увеличение скорости растяжения мышцы сопровождается увеличением силы тяги. Это является причиной многочисленных травм у спортсменов (например, разрыва ахиллова сухожилия у спринтеров и прыгунов в длину).

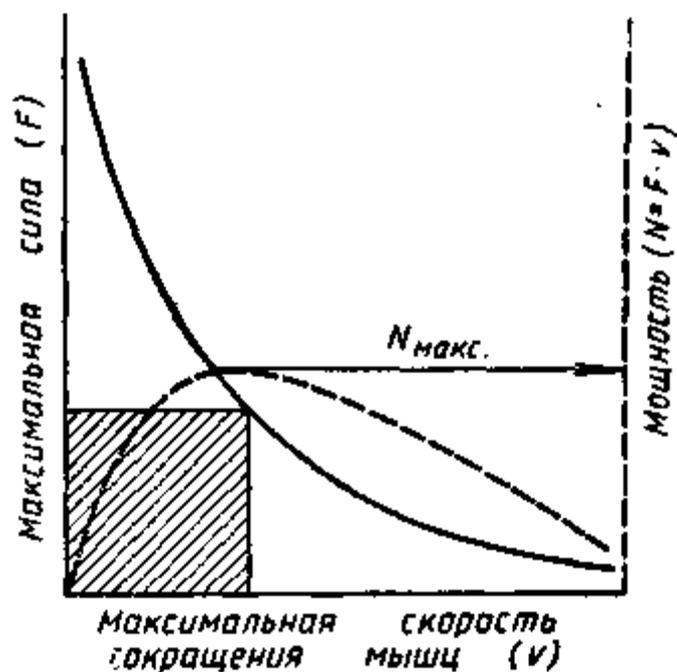


Рис. 15. Мощность мышечного сокращения в зависимости от проявляемой силы и скорости; заштрихованный прямоугольник соответствует максимальной мощности

Групповое взаимодействие мышц

Существуют два случая группового взаимодействия мышц: синергизм и антагонизм.

Мышцы-синергисты перемещают звенья тела в одном направлении. Например, в сгибании руки в локтевом суставе участвуют двуглавая мышца плеча, плечевая и плечелучевая мышцы и т. д. Результатом синергического взаимодействия мышц служит увеличение результирующей силы действия. Но этим значение синергизма мышц не исчерпывается. При наличии травмы, а также при локальном утомлении какой-либо мышцы ее синергисты обеспечивают выполнение двигательного действия.

Мышцы-антагонисты (в противоположность мышцам-синергистам) имеют разнонаправленное действие. Так, если одна из них выполняет преодолевающую работу, то другая — уступающую. Существованием мышц-антагонистов обеспечивается: 1) высокая точность двигательных действий; 2) снижение травматизма.

Мощность и эффективность мышечного сокращения

По мере увеличения скорости мышечного сокращения сила тяги мышцы, функционирующей в преодолевающем режиме, снижается по гиперболическому закону (см. рис. 14). Известно, что механическая мощность равна произведению силы на скорость. Существуют сила и скорость, при которых мощность мышечного сокращения наибольшая (рис. 15). Этот режим имеет место, когда и сила, и скорость составляют примерно 30% от максимально возможных величин.

Наряду с режимом максимальной мощности представляет интерес и наиболее экономичный режим мышечного сокращения (см. в разделе «Частная биомеханика»).

Контрольные вопросы

1. Какими показателями характеризуется геометрия масс тела?
2. У кого из двух бегунов (рис. 16) левая нога имеет меньший радиус инерции и меньший момент инерции относительно тазобедренного сустава. Как это учитывается при технической подготовке бегунов?

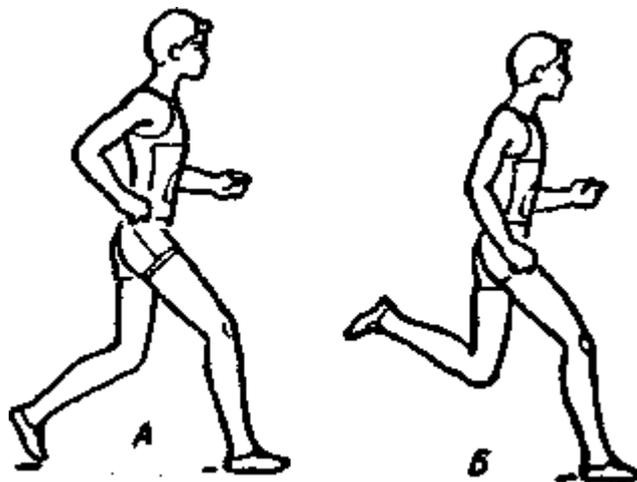


Рис. 16 - Два варианта техники бега; при переносе ноги у бегуна Б угол в коленном суставе и момент инерции меньше, чем у бегуна А.

3. При каком условии рычаг, изображенный на рис. 9, Л, будет находиться в равновесии (объясните и напишите формулу)?
4. Какие показатели геометрии масс нужно знать, чтобы вычислить наиболее экономичный темп ходьбы? Насколько точным будет этот расчет?
5. Какова прочность костей и мышц?
6. Нарисуйте кривую Хилла и укажите на ней области, соответствующие преодолевающему, уступающему и изометрическому (удерживающему) режимам мышечного сокращения.
7. Объясните, почему один из двух вариантов выполнения “креста Азаряна” (из верхней и из нижней точки) легче осуществить, чем другой.
8. В каком режиме мышечного сокращения проявляется максимальная сила? Как это связано с опасностью получения травм?
9. При каком условии достигается наивысшая мощность мышечного сокращения?
10. Решите кроссворд (рис. 17).

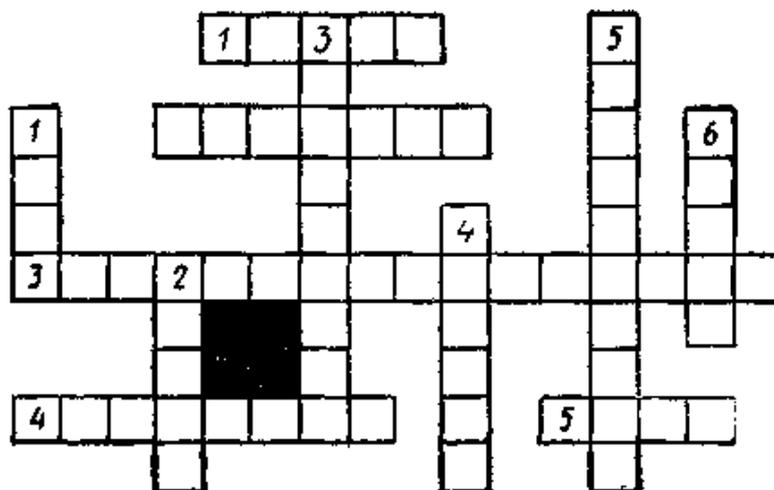


Рис. 17. Кроссворд.

По горизонтали. 1. Характеристика, показывающая, сколько вещества содержится в теле и какова инертность тела. 2. Укрупненное звено тела, включающее в себя несколько простейших звеньев. 3. Режим сокращения мышцы. 4. Показатель, характеризующий мышечное сокращение и достигающий максимума, когда сила и скорость сокращения мышцы близки к 30% от наибольших величин. 5. Естествоиспытатель, лауреат Нобелевской премии, изучавший взаимосвязь между силой и скоростью мышечного сокращения.

По вертикали. 1. Взаимное расположение частей тела. 2. Часть тела, расположенная между двумя суставами или между суставом и дистальным концом тела. 3. Число звеньев человеческого тела (ориентировочно). 4. Сокращенное наименование антагониста трехглавой мышцы плеча. 5. Свойство мышцы. 6. Вид механического воздействия на кость.

ГЛАВА 3. ОСНОВЫ БИОМЕХАНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Наука начинается с тех пор, как начинают измерять.
Точное знание немислимо без меры.

Д. И. Менделеев

От интуиции — к точному знанию!

Двигательное мастерство человека, его умение в любых условиях двигаться быстро, точно и красиво, зависит от уровня физической, технической, тактической, психологической и теоретической подготовленности. Эти пять факторов культуры движений являются ведущими и в спорте, и в физическом воспитании школьников, и при занятиях массовыми формами физкультуры. Для совершенствования двигательного мастерства и даже для сохранения его на прежнем уровне необходим контроль за каждым из названных факторов.

Объектом биомеханического контроля служит моторика человека, т. е. двигательные (физические) качества и их проявления. Это означает, что в итоге биомеханического контроля мы получаем сведения:

- 1) о технике двигательных действий и тактике двигательной деятельности;
- 2) о выносливости, силе, быстроте, ловкости и гибкости, уровень которых является необходимым условием высокого технико-тактического мастерства (В англоязычной литературе по физическому воспитанию принят более широкий перечень двигательных качеств, в том числе способность выполнять упражнения на равновесие, танцевальные упражнения и т. д.).

Можно сказать еще проще: биомеханический контроль дает ответ на три вопроса:

- 1) Что делает человек?
- 2) Насколько хорошо он делает это?
- 3) Благодаря чему он это делает?

Процедура биомеханического контроля соответствует следующей схеме:

контроль = тестирование (измерение) + оценивание результатов измерения или тестирования

ИЗМЕРЕНИЯ В БИОМЕХАНИКЕ

Человек становится объектом измерения с раннего детства. У новорожденного измеряют рост, вес, температуру тела, продолжительность сна и т. д. Позже, в школьном возрасте, в число измеряемых переменных включаются знания и умения. Чем взрослее человек, чем шире круг его интересов, тем многочисленнее и разнообразнее характеризующие его показатели. И тем труднее осуществить точные измерения. Как, например, измерить техническую и тактическую подготовленность, красоту движений, геометрию масс человеческого тела, силу, гибкость и т. п.? Об этом рассказывается в настоящем разделе.

Шкалы измерений и единицы измерений

Шкалой измерения называется последовательность величин, позволяющая установить соответствие между характеристиками изучаемых объектов и числами. При биомеханическом контроле чаще всего используют шкалы наименований, отношений и порядка.

Шкала наименований — самая простая из всех. В этой шкале числа, буквы, слова или другие условные обозначения выполняют роль ярлыков и служат для обнаружения и различения изучаемых объектов. Например, при контроле за тактикой игры футбольной команды полевые номера помогают опознать каждого игрока.

Числа или слова, составляющие шкалу наименований, разрешается менять местами. И если их без ущерба для точности значения измеряемой переменной можно менять местами, то эту переменную следует измерять по шкале наименований. Например, шкала наименований используется при определении объема техники и тактики (об этом рассказывается в следующем разделе).

Шкала порядка возникает, когда составляющие шкалу числа упорядочены по рангам, но интервалы между рангами нельзя точно измерить. Например, знания по биомеханике или навыки и умения на уроках физкультуры оцениваются по шкале: “плохо” — “удовлетворительно” — “хорошо” — “отлично”. Шкала порядка дает возможность не только установить факт равенства или неравенства измеряемых объектов, но и определить характер неравенства в качественных понятиях: “больше — меньше”, “лучше — хуже”. Однако на вопросы: “На сколько больше?”, “На сколько лучше?” — шкалы порядка ответа не дают.

С помощью шкал порядка измеряют “качественные” показатели, не имеющие строгой количественной меры (знания, способности, артистизм, красоту и выразительность движений и т. п.).

Шкала порядка бесконечна, и в ней нет нулевого уровня. Это и понятно. Какой бы неправильной ни была, например, походка или осанка человека, всегда можно встретить еще худший вариант. И с другой стороны, какими бы красивыми и выразительными не были двигательные действия гимнастки, всегда найдутся пути сделать их еще прекраснее.

Шкала отношений самая точная. В ней числа не только упорядочены по рангам, но и разделены равными интервалами — единицами измерения¹. Особенность шкалы отношений состоит в том, что в ней определено положение нулевой точки.

По шкале отношений измеряют размеры и массу тела и его частей, положение тела в пространстве, скорость и ускорение, силу, длительность временных интервалов и многие другие биомеханические характеристики. Наглядными примерами шкалы отношений являются: шкала весов, шкала секундомера, шкала спидометра.

Шкала отношений точнее шкалы порядка. Она позволяет не только узнать, что один объект измерения (технический прием, тактический вариант и т. п.) лучше или хуже другого, но и дает ответы на вопросы, на сколько лучше и во сколько раз лучше. Поэтому в биомеханике стараются применять именно шкалы отношений и с этой целью регистрируют биомеханические характеристики.

¹ Основными единицами измерения в системе СИ (система интернациональная) являются: метр, килограмм, секунда и др. Из основных получаются все другие единицы. Например, единица скорости (м/с), единица ускорения (м/с²), единица силы (ньютон, $N = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$) и т. д. Наряду с единицами системы СИ в практике биомеханического контроля используют и внесистемные единицы измерения: например, частоту шагов (или темп), гребков и других циклических движений измеряют числом движений в минуту ($\frac{1}{\text{мин}}$), а не в секунду.

Биомеханические характеристики

Биомеханическими характеристиками называются показатели, используемые для количественного описания и анализа двигательной деятельности. Все биомеханические характеристики делятся на кинематические, динамические и энергетические (табл. 3). У них разное назначение: кинематические характеризуют внешнюю картину двигательной деятельности, динамические несут информацию о причинах изменения движений, энергетические дают представление о механической производительности и экономичности.

Биомеханические характеристики описывают поступательные и вращательные движения. Поступательным называется такое движение, при котором все точки тела перемещаются по одинаковым траекториям. При вращательном движении движущиеся точки тела перемещаются по круговым траекториям, центры которых лежат на оси вращения.

Но в большинстве движений человека поступательный и вращательный компоненты присутствуют одновременно, такие движения называются составными. Причем двигательный аппарат человека устроен так, что все движения (в том числе и поступательные) образуются из комбинаций вращательных движений в суставах (рис. 18).

Дадим определения биомеханическим характеристикам, включенным в таблицу 3. Но сначала расскажем о двух важных характеристиках, которые не вошли в таблицу, — о положении и траектории.

Положение любой точки тела (например, любого сустава) или положение спортивного снаряда (например, мяча) определяется координатами в той или иной системе координат. Наиболее популярна прямоугольная система координат, в которой положение материальной точки в пространстве описывается ее координатами на трех взаимно перпендикулярных осях (вертикальной и двух горизонтальных — продольной и поперечной) (рис. 19).

Задание для самопроверки знаний:

На рис. 19 определите координаты выделенных точек (центра масс головы и т. д.).

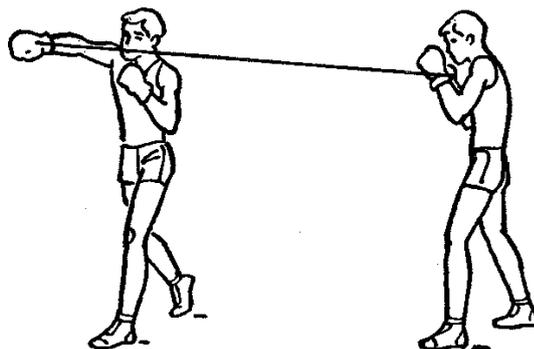


Рис. 18. Поступательные движения человеческого тела и его частей как результат вращательных движений; например, прямолинейное движение боксерской перчатки образуется из движений в локтевом, плечевом и тазобедренном суставах; прямая линия — траектория центра масс кисти правой руки в перчатке

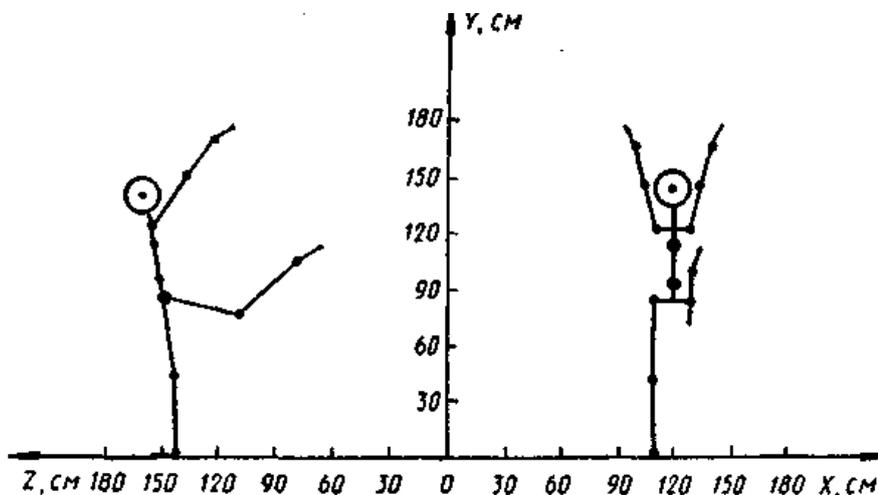


Рис. 19. Схематическое изображение (в прямоугольных координатах) гимнастки, выполняющей упражнение на равновесие: справа — вид спереди (фронтальная проекция); слева — вид. сбоку (сагиттальная проекция)

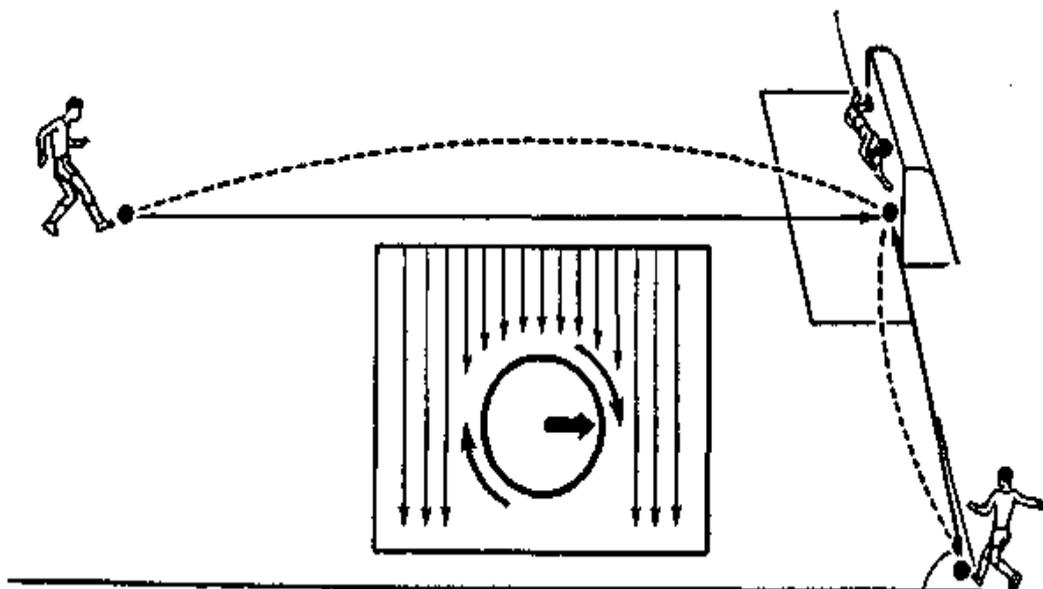


Рис. 20. Траектория полета мяча при ударе футболиста (пунктир); сплошной линией показано перемещение мяча (расстояние по прямой от ноги футболиста до линии ворот). Обратите внимание на возможность забить гол с углового удара, если “закрутить” мяч, как это показано в прямоугольном фрагменте рисунка. Крутясь, мяч приводит во вращение близлежащие слои воздуха (см. круговые стрелки). Их скорость складывается со скоростью воздушного потока справа от мяча и вычитается из нее слева от мяча. По закону Бернулли давление воздуха меньше там, где выше скорость. Поэтому возникает сила (одинарная стрелка), направленная в ту сторону, где давление меньше

Классификация биомеханических характеристик и их единицы измерения

Биомеханические характеристики

Кинематические		Энергетические		Динамические	
Для поступательного движения	Для вращательного движения	Для поступательного движения	Для вращательного движения	Для поступательного движения	Для вращательного движения
м	перемещение град.	Работа, Дж	Момент инерции, кг·м ²	Масса, кг	Момент силы, Н·м (вращающий момент)
с	длительность с	Энергия, Дж	Экономичность (коэффициент механической эффективности, %)	Сила, Н	Импульс момента силы, Нмс
м/с	скорость град./с	Мощность, Вт	Энергетическая стоимость, $\frac{\text{Дж}}{\text{м}}$, и пульсовая стоимость, $\frac{1}{\text{м}}$	Импульс силы, Нс	Кинетический момент, $\frac{\text{кг}\cdot\text{м}^2}{\text{с}}$
м/с ²	ускорение град./с ²				
1/мин	темп — ритм				

При выполнении двигательного действия положение тела или спортивного снаряда изменяется. При этом их материальные точки движутся в пространстве по линиям, которые называются траекториями (рис. 20).

Траектория может иметь любую, сколь угодно сложную форму. В отличие от нее линейное перемещение

(ΔS) — расстояние по прямой (Точнее, вектор, поскольку, говоря о перемещении, необходимо указывать не только расстояние, но и направление.) между конечным и начальным положением тела. Линейное перемещение измеряется в единицах длины (метрах).

Угловое перемещение

($\Delta \varphi$) — угол поворота тела или отдельного сегмента. Угловое перемещение измеряется в градусах.

Задание для самоконтроля знаний: рассматривая рис. 18, приведите примеры линейного и углового перемещений. Затем придумайте другие примеры.

Скорость показывает, как быстро изменяются координаты тела или его материальных точек. Скорость равна частному от деления перемещения (т. е. разности координат) на интервал времени, за который это перемещение произошло:

— линейная скорость $v = \frac{\Delta S}{\Delta t} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$;
 — угловая скорость $\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} \left(\frac{\text{град}}{\text{с}} \right)$.
 Ускорение характеризует быстроту изменения скорости:

— линейное ускорение $a = \frac{\Delta V}{\Delta t} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right)$;
 — угловое ускорение $\epsilon = \frac{\Delta \omega}{\Delta t} \left(\frac{\text{град}}{\text{с}^2} \right)$.

Получаемые в результате измерений и расчетов величины перемещения, скорости и ускорения зависят от принятой системы отсчета. Например, при беге скорость руки или ноги относительно беговой дорожки равна ее скорости относительно общего центра масс бегуна плюс или минус скорость общего центра масс относительно дорожки. Этот факт необходимо учитывать при определении механических энергозатрат и выявлении энергетически оптимальных режимов двигательной деятельности.

При изучении периодически повторяющихся движений (циклических) важно знать:

- 1) темп (n) — число движений в единицу времени;
- 2) длительность цикла (T) — интервал времени между одинаковыми фазами циклического движения.

Темп и длительность цикла связаны между собой соотношением

$$T = \frac{1}{n}. \quad \text{Например, если брассист выполнит 50 циклов в минуту}$$

$\left(n = 50 \frac{1}{\text{мин}} \right)$, то длительность цикла равна:

$T = \frac{1}{50} \text{ мин} = 1,2 \text{ с.}$ Мы только что встретились с новым и очень важным понятием — фаза двигательного действия. Фазами называются временные элементы двигательных действий. Например, ударное действие теннисиста (см. рис. 2) состоит из пяти фаз, длительности которых обозначены

$$\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4, \Delta t_5.$$

Соотношение длительностей фаз называется ритмом двигательного действия. Графическое изображение ритма называется хронограммой.

Фазовый анализ двигательной деятельности — один из самых полезных методов, применяемых при биомеханическом контроле. Определение длительностей фаз, ритма и построение хронограммы позволяют “читать” и “записывать” элементы двигательной деятельности подобно тому, как по нотам можно записывать и воспроизводить музыку. Тем самым возникает возможность документирования техники и тактики, запоминания и изучения лучших образцов, целенаправленного обучения.

Переходим к описанию динамических характеристик. В отличие от кинематических их невозможно оценить по внешней картине движений, на глаз. Здесь всегда требуется измерительная аппаратура. Динамические характеристики измеряют потому, что именно они помогают разобраться в сложных механизмах формирования движений и, следовательно, найти пути овладения ими, их совершенствования и исправления возможных ошибок. Ведь ошибки в кинематике (внешней картине движений) всегда есть следствие несвоевременных и нерациональных (недостаточных или чрезмерных) мышечных усилий и неумелого использования внешних сил.

Ускорение, приобретаемое телом, обратно пропорционально его инертности и прямо пропорционально воздействующей силе:

- линейное ускорение $a = \frac{F}{m}$;
- угловое ускорение $\varepsilon = \frac{m}{J} = \frac{F \cdot l}{m \cdot R_{\text{ин}}^2}$.

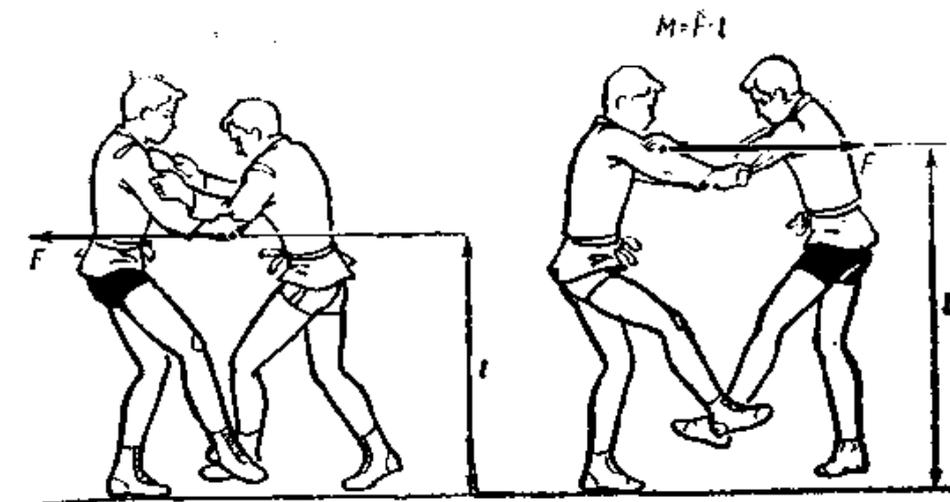


Рис. 21. Пример из борьбы, показывающий, что, чем длиннее плечо силы, тем больше момент силы $M = F \cdot e$, вызывающий круговое движение, в данном случае опрокидывающий момент (e)

Чтобы найти ускорение тела в поступательном движении, достаточно знать величины силы и массы. При вращательном движении ситуация сложнее. Во-первых, инертность вращающегося тела определяется не массой, а моментом инерции (см. в главе 2). Во-вторых, эффект действия силы в этом случае зависит не только от ее величины, но и от места приложения. Чем длиннее плечо силы — кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы, тем больше момент силы, или вращающий момент (M), равный произведению силы на ее плечо (рис. 21).

Поскольку ускорение есть приращение скорости в единицу времени

$\left(a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \text{ и } \epsilon = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}\right)$, приведенные выше формулы можно переписать следующим образом:

— для поступательного движения

$$\Delta v = \frac{F \Delta t}{m};$$

— для вращательного движения

$$\Delta \omega = \frac{M \Delta t}{J}.$$

Здесь нам открывается закономерность, которую мы хорошо знаем в повседневной жизни, но не всегда используем при занятиях физкультурой и спортом. Она состоит в том, что эффект действия силы (в данном случае приращение скорости) зависит не только от величины силы, но и от продолжительности ее действия

(Δt) .

В связи со сказанным еще две биомеханические характеристики получили “права гражданства” (рис. 22)

— импульс силы $F \Delta t$;

— импульс момента силы $\bar{M} \Delta t$,

Где

$$\Delta t = t_{\text{к}} - t_{\text{н}}$$

- интервал времени от начала до окончания действия силы;

F и \bar{M} — средние величины силы и вращающего момента.

Переходим к рассмотрению энергетических характеристик. Большинство из них вычисляется из кинематических и динамических характеристик. Так, механическая работа есть произведение силы на перемещение:

$$A = F \Delta S.$$

Например, для того чтобы подняться по канату на высоту 5 м, мальчик с массой тела в 30 кг выполняет работу около 1500 джоулей:

$$30 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 5 \text{ м} \approx 300 \text{ Н} \cdot 5 \text{ м} = 1500 \text{ Дж}.$$

Если этот подъем длился 10 с, развиваемая мальчиком мощность равна $1500 \text{ Дж} : 10 \text{ с} = 150 \text{ Вт}$. Это значительная мощность (вспомните, как ярко светит такая электрическая лампочка).

Итак, мощность вычисляется по формуле

$$N = \frac{A}{\Delta t} = \frac{F \Delta S}{\Delta t} = F \cdot v.$$

Последний переход в преобразовании формулы особенно важен. Он дает возможность определить мощность коротких интенсивных движений (например, ударов по мячу, боксерских ударов и других ударных действий), когда механическую работу определить трудно, но можно измерить силу и скорость. Так, при ударе классного футболиста по мячу сила действия может достигать 400 Н, а скорость вылета мяча 30 м/с. В этом случае развиваемая мощность составляет 12000 Вт. Образно говоря, при таком ударе на короткий миг зажигается 120 электрических лампочек, по 100 Вт каждая.

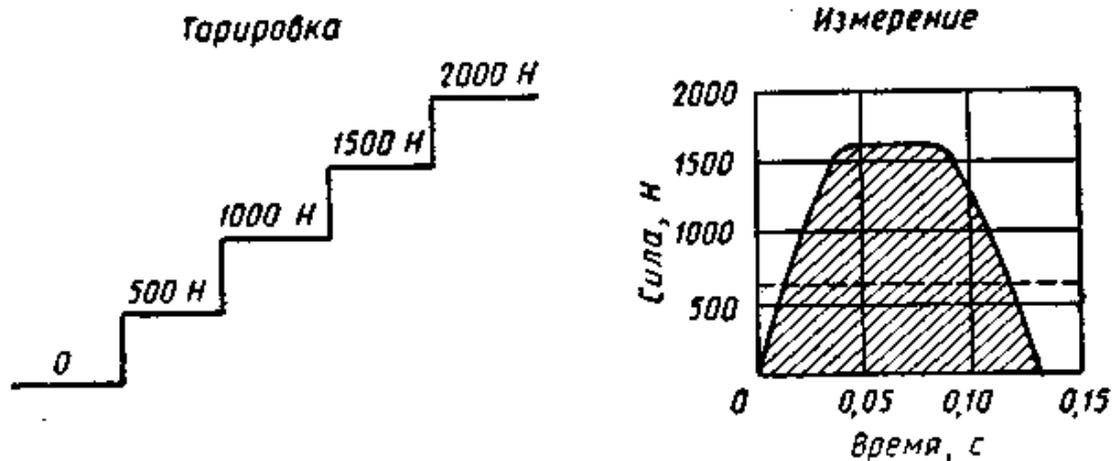


Рис. 22. Динамограмма отталкивания спринтера от стартовых колодок; импульс силы равен интегралу силы по времени, или произведению средней величины силы (пунктир) на продолжительность ее действия (площадь заштрихованной фигуры равна величине импульса силы); слева — тарировочный график, позволяющий отсчитывать величины силы в ньютонах

Совершаемая человеком механическая работа расходуется на увеличение потенциальной и кинетической энергии человеческого тела, спортивных снарядов и других предметов. Потенциальная энергия (E_n) и кинетическая энергия тела в поступательном ($E_k^{пост}$) и вращательном ($E_k^{вр}$) движениях определяются по формулам:

$$E_n = mgh; E_k^{пост} = \frac{mv^2}{2}; E_k^{вр} = \frac{J\omega^2}{2},$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободнопадающего тела, h — высота центра масс тела над поверхностью земли, v — линейная скорость, ω — угловая скорость, m — масса, J — момент инерции.

Полная энергия движущегося тела согласно теореме Кенига равна сумме его потенциальной энергии и кинетической энергии в поступательном и вращательном движениях:

$$E_{полн} = mgh + \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}.$$

До сих пор речь шла о механической работе и мощности. Но, как известно, в форму механической энергии превращается меньшая часть энергии, образующейся в мышцах. Большая ее часть переходит в тепло.

Подобно тому как технические машины (автомобиль, тепловоз) характеризуются коэффициентом полезного действия, экономичность двигательного аппарата человека описывается рядом аналогичных показателей. В их числе:

$$\text{КМЭ} = \frac{A}{E} \cdot 100 \% = \frac{N}{\dot{E}} \cdot 100 \%,$$

где E — количество метаболической энергии (Метаболическая энергия образуется в клетках нашего тела в результате трех типов биохимических реакций: креатинкиназной, анаэробного гликолиза и окислительного фосфорилирования. Подробнее об этом можно прочитать в учебниках по биохимии и физиологии, а также в научно-популярной литературе (например: Яковлев Н. Н. Химия движений.—Л., 1983).),

\dot{E} — скорость ее расходования, Вт;

—энергетическая стоимость метра пути или единицы полезной работы; для того чтобы определить энергетическую стоимость бега, нужно разделить скорость расходования метаболической энергии на скорость бега:

$$\text{ЭС} \left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}} \right) = \frac{\dot{E}(\text{Вт})}{v(\text{м/с})};$$

—пульсовая стоимость метра пути или единицы полезной работы; например, пульсовая стоимость ходьбы, бега и других циклических локомоций вычисляется по формуле

$$\text{ПС} \left(\frac{1}{\text{м}} \right) = \frac{\text{ЧСС}(1/\text{мин})}{60 \cdot v(\text{м/с})}.$$

Пульсовую стоимость проще измерить, чем энергетическую. И кроме того, в некоторых ситуациях пульсовая стоимость информативнее энергетической (например, при биомеханическом контроле за двигательной деятельностью в условиях жары).

Биомеханические характеристики — один из хрестоматийных вопросов биомеханики. Без свободного владения сведениями о биомеханических характеристиках так же нельзя рассчитывать на успех в изучении и практическом применении биомеханики, как невозможно читать книгу, не зная алфавита.

ГЛАВА 3. ОСНОВЫ БИОМЕХАНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ (ч.2)

Количественная оценка технико-тактического мастерства

Технико-тактическое мастерство, или двигательную культуру, человека определяют:

- 1) объем техники и тактики;
- 2) разносторонность техники и тактики;
- 3) эффективность и рациональность техники и тактики;
- 4) освоенность техники и тактики.

Объемом техники называется совокупность технических приемов, которыми владеет человек. Объем тактики — совокупность тактических вариантов, которыми владеет спортсмен или спортивный коллектив.

Для контроля за объемом техники и тактики служат шкалы наименований.

В каждом виде двигательной деятельности свой арсенал технических приемов и тактических вариантов. Объем техники и тактики обычно составляет часть этого арсенала.

Лишь мастерски подготовленный человек владеет всеми богатствами техники и тактики. Но и он реализует все свои технико-тактические возможности (общий объем техники и общий объем тактики) только в спокойной обстановке. В стрессовой ситуации (например, на спортивных состязаниях) используется только соревновательный объем техники и тактики, составляющий часть общего объема. Например, в арсенале борьбы самбо несколько сотен приемов. Но даже мастер спорта в совершенстве владеет лишь десятками из них. На ответственных соревнованиях он применяет несколько наиболее отработанных приемов, а завершает схватку, как правило, одним или двумя коронными приемами.

Результаты контроля за объемом техники и тактики удобно представлять в форме таблицы (табл. 4).

В практической деятельности педагог старается приблизить общий объем техники и тактики своих учеников к технико-тактическому арсеналу данного вида спорта и, кроме того, стремится увеличить соревновательный объем техники и тактики. Достигается это разучиванием новых приемов и освоением уже разученных, в процессе чего повышается разносторонность, эффективность и освоенность техники и тактики.

Технический арсенал каждого вида спорта состоит из групп технических элементов. Например, техника борьбы включает в себя приемы борьбы в стойке и в партере. А объем техники гимнаста состоит из технических элементов, выполняемых на различных снарядах. Техника называется разносторонней, если в объеме техники в равной мере представлены технические приемы из различных групп.

И тактика является разносторонней только в том случае, если в объем тактики входят тактические варианты из разных групп. Например, перед бегуном или пловцом может стоять одна из двух задач, требующих различной тактики:

- 1) показать наилучший для себя результат (тактика рекорда);
- 2) победить (попасть в число призеров, финалистов) независимо от того, какой будет показан результат (тактика победы).

Разносторонне подготовленным в тактическом отношении является тот спортсмен, кто сумеет и выложиться, устанавливая рекорд, и победить конкретного соперника.

Также и тактику в игровых видах спорта можно только тогда назвать разносторонней, если спортсмен или команда одинаково хорошо владеет тактическими вариантами игры в защите и в нападении.

Подобно объему, разносторонность техники и тактики делится на общую (демонстрируемую в обычных условиях) и соревновательную (характерную для стрессовых ситуаций).

Эффективность техники двигательных действий и эффективность тактики двигательной деятельности — это степень соответствия техники и тактики конкретного человека избранному критерию оптимальности. Иначе говоря, наиболее эффективный вариант техники (и тактики) — это индивидуально-оптимальный вариант.

Индивидуально-оптимальные варианты техники и тактики до сих пор находили опытным путем. Современные вычислительные машины дают возможность моделировать двигательную деятельность и в наглядной форме получать изображение оптимальной техники или тактики (рис. 23, 24).

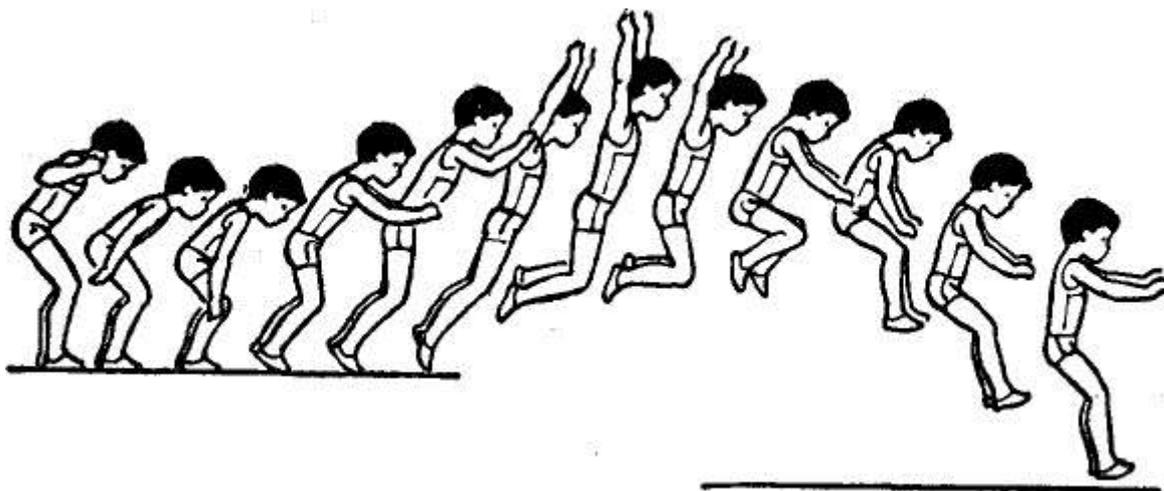


Рис. 23. Результат моделирования прыжка, полученный с помощью электронно-вычислительной машины и представленный в наглядной графической форме на выводном устройстве ЭВМ (по Garret соавт.)

Задание для самоконтроля знаний

Приведите примеры, в которых эффективность двигательной деятельности определяется по критериям экономичности, эстетичности, точности, механической производительности, и в каждом случае укажите, по какой шкале и в каких единицах измеряется эффективность (Если ответ на этот вопрос вызовет затруднения, еще раз проштудируйте главу 1 и начальные разделы главы 3.).

При биомеханическом контроле за коллективами людей, занимающихся физкультурой, эффективность двигательной деятельности оценивается по степени близости техники и тактики не к индивидуально-оптимальному, а к рациональному варианту. Такая ситуация имеет место на уроке физкультуры в школе и при проведении занятий с группами здоровья.

Рациональным называется тот вариант техники или тактики, который является наилучшим для большинства людей в той или иной возрастной или квалификационной группе. Например, большинство школьников прыгает в высоту способом «ножницы» или «перекидной». Другой пример: при беге на длинные дистанции рационален бег с постоянной скоростью, без рывков и замедлений.

К рациональным вариантам техники и тактики, как к эталонам, стремятся при обучении начинающих. Например, начинающим лыжникам рассказывают, какие способы бега на лыжах целесообразно применять на равнинных участках трассы, а какие — на подъемах различной крутизны.

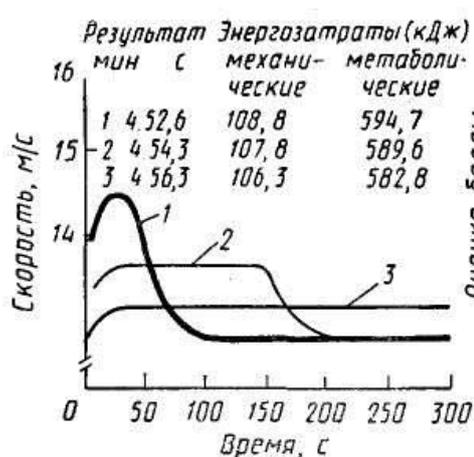


Рис. 24. Полученная на ЭВМ динамика скорости, энергозатраты и результат велосипедиста-перворазрядника в гонке на 4 км при разной величине стартовой скорости; оптимальный тактический вариант выделен жирной линией

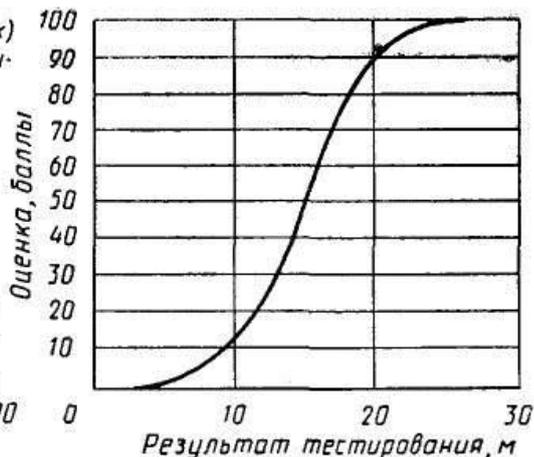


Рис. 25. Шкала оценки результатов детей 10 лет в ударе ногой по мячу на дальность (по цифрам таблицы 5)

Понятно, что рациональный (т. е. наилучший для большинства людей) вариант техники или тактики может существенно отличаться от эффективного, т. е. индивидуально-оптимального варианта. Так, на дистанции 10 км рациональна тактика равномерного бега. Но двукратный олимпийский чемпион В. Куц специальными тренировками готовил себя к бегу с многочисленными ускорениями и часто побеждал, навязывая соперникам этот нерациональный тактический вариант.

Следующий показатель, характеризующий двигательное мастерство человека,— освоенность техники и тактики. Освоенностью техники и тактики называется их стабильность в стандартных условиях и устойчивость в усложненных условиях.

Освоенность количественно оценивается по снижению эффективности техники и тактики в усложненных условиях по сравнению с комфортными. В приведенном примере эффективность техники, оцениваемая числом попаданий по отношению к числу бросков, не снизилась и осталась на уровне 100%.

Известны и другие примеры высокой освоенности техники и тактики. Так, сохранились кинокадры бега В. Веденина, где этот великолепный мастер до последних метров дистанции демонстрирует филигранную технику лыжного хода, а сразу после финиша падает на руки товарищей из-за крайнего утомления.

Но далеко не всегда освоенность бывает высокой. К сожалению, слишком часто футболисты, которые на тренировках демонстрируют весьма совершенную технику владения мячом, в ответственных матчах не попадают в пустые ворота. А коллективная игра, наигранные тактические комбинации разлаживаются при встрече с сильным соперником.

Как и эффективность, освоенность техники и тактики в большинстве случаев удается измерить по шкалам отношений.

Задание для самоконтроля знаний: предложите шкалы для измерения освоенности техники или тактики в вашем виде спорта.

Точность измерений

Результат измерений всегда содержит погрешность, величина которой тем меньше, чем точнее метод измерений и измерительный прибор. В задачу биомеханических измерений входит не только нахождение измеряемой величины, но и оценка допущенной погрешности.

Различают абсолютную и относительную погрешности измерения. 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 визуальном измерении темпа бега истинное его значение может быть найдено при помощи видеомагнитофона. 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:

$$A_{д} = \frac{\Delta A}{A_0} \cdot 100 \%$$

Если известно предельное, или максимально возможное, значение измеряемой величины (A_m), то наряду с действительной может быть определена и приведенная относительная погрешность:

$$A_{п} = \frac{A}{A_m} \cdot 100 \%$$

Эту величину обычно указывают в технической документации измерительной аппаратуры и называют классом точности. Например, если динамометрический (силоизмерительный) прибор пригоден для измерения величины силы до 5000 Н (Вопрос для самоконтроля знаний: сколько это «килограммов силы»? И еще вопрос: с какой силой спокойно стоящий человек воздействует на пол, если масса его тела 50 кг?) и сила измеряется с абсолютной погрешностью 50 Н, то в паспорте прибора указывается класс его точности, в данном случае 1 % (приведенная относительная погрешность, вычисленная как $(50/5000) \cdot 100\%$).

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 наиболее эффективна тарировка измерительной аппаратуры. 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 (соответствующие величинам силы 100 Н, 200 Н, 300 Н и т. д.) фиксируются на ленте регистрирующего прибора. В дальнейшем результаты измерений сравнивают с полученной таким образом тарировочной сеткой (см. рис.22).

Помимо систематических погрешностей, результаты измерений искажаются случайными погрешностями. Случайные погрешности возникают в силу разнообразных причин, которые ни предсказать заранее, ни точно учесть невозможно. Случайные погрешности принципиально неустранимы. Однако, воспользовавшись методами математической статистики, можно количественно оценить величину случайной погрешности и учесть ее при объяснении результатов измерений.

Тестирование и педагогическое оценивание в биомеханике

В переводе с английского test означает «проба», «испытание». В биомеханике тестированием называется контрольное испытание человека, осуществляемое для определения его технической и тактической подготовленности. Можно сказать и так: тестирование — это косвенное измерение.

Измерение заменяют тестированием в двух случаях:

- во-первых, когда изучаемый объект недоступен прямому измерению;
- во-вторых, когда изучаемое явление не вполне конкретно.

Например, невозможно определить топографию работающих мышц и мышечную силу борца непосредственно во время схватки. Поэтому применяют косвенные измерения в тренировочных или лабораторных условиях.

Другой пример: правильнее говорить о тестировании двигательных качеств, чем об их измерении. Так, в итоге измерений, описанных в предыдущих разделах, получают показатели, лишь косвенно характеризующие двигательные качества, спортивно-техническое и спортивно-тактическое мастерство.

Чтобы педагог смог использовать результаты тестирования в своей практической деятельности, их подвергают педагогическому оцениванию, т. е. ставят оценку, выражая ее в очках или баллах. Для этого составлены специальные таблицы и шкалы педагогических оценок.

Качество теста

Точность тестирования оценивается иначе, чем точность измерения. При оценке точности измерения результат измерения сопоставляют с результатом, полученным более точным методом. При тестировании возможность сравнения полученных результатов с более точными чаще всего отсутствует. Поэтому нужно проверять не результаты тестирования, а качество теста. И проверку эту следует осуществлять еще до начала тестирования.

Качество теста зависит от его информативности и надежности.

Информативность показывает, в какой мере тест пригоден для оценки интересующего нас явления (например, одного из двигательных качеств, уровня технической подготовленности и т. п.).

Информативность иногда называют валидностью (от английского valid — действенный, имеющий силу; сравните: инвалидность — несостоятельность, недееспособность).

Различают информативность содержательную (логическую) и эмпирическую (определяемую экспериментально).

Содержательная информативность определяется «логически», из соображений здравого смысла. Например, высота прыжка — информативный показатель при контроле за техническим мастерством гимнастки, а цвет глаз — неинформативный. Но чаще всего необходимы методы определения эмпирической информативности, основанные на вычислении коэффициента информативности.

Коэффициент информативности — это коэффициент корреляции между результатами тестирования и результатами измерения критерия информативности. Критерием информативности может служить:

- 1) результат, показанный на спортивных соревнованиях;
- 2) спортивная квалификация;
- 3) экспертная оценка того качества, которое тестируется.

При биомеханическом контроле следует применять только те тесты, которые обладают высокой информативностью.

Приведем пример из биомеханического контроля в художественной гимнастике. Спортсменки выполняли прыжок «в шпагат». Качество прыжков оценивалось экспертами, и в то же время измерялись биомеханические характеристики: сила отталкивания, длительность фазы опоры и длительность фазы полета. Оказалось, что наибольшей информативностью обладает величина максимальной силы отталкивания: чем сильнее отталкивается спортсменка, тем (в среднем) выше качество прыжка. Коэффициент информативности этого показателя равен 0,70. Такая информативность в теории тестов оценивается как удовлетворительная. Информативность считается отличной, если коэффициент информативности равен 0,85 и выше.

Надежность теста — это степень совпадения результатов многократного тестирования одних и тех же людей в одних и тех же условиях.

Как и информативность, надежность оценивается по величине коэффициента корреляции. Коэффициентом надежности служит коэффициент корреляции между двумя рядами результатов, полученных при первом и втором тестировании группы людей. Надежность считается:

- отличной, если коэффициент надежности больше или равен 0,95;
- хорошей, когда $0,90 \leq r_{tt} < 0,95$;
- удовлетворительной при $0,80 \leq r_{tt} < 0,90$.

Отсюда название простейшего способа проверки надежности теста — метода повторного тестирования (или test-re-test метода).

Надежность имеет разновидности — воспроизводимость и объективность. Методом повторного тестирования проверяется воспроизводимость результатов тестирования. Воспроизводимость теста высока, если при втором тестировании спортсмены ранжируются так же, как при первом.

Объективностью (или согласованностью) теста называется степень независимости получаемых результатов от личных свойств человека, осуществляющего тестирование. Чем проще процедура тестирования, тем выше объективность теста. И наоборот, объективность теста снижается по мере повышения требований к квалификации человека, проводящего тестирование.

Так, высока объективность тестов комплекса ГТО, для проведения которых достаточно секундомера и рулетки. И значительно ниже, например, объективность тестов, в которых определяется экономичность техники и тактики, поскольку в этом случае нужно использовать достаточно сложные методы измерения энергетических затрат (О том, как определить коэффициенты надежности и объективности, можно прочитать в кн.: Уткин В. Л. Измерения в спорте (введение в спортивную метрологию).—М., 1978; Спортивная метрология/Под общ. ред. В. М. Зациорского.— М., 1982.).

Педагогическое оценивание

Педагогическое оценивание — завершающий этап процедуры тестирования. Оно необходимо потому, что на итоговую оценку результатов тестирования оказывают влияние пол и возраст человека, состояние здоровья, температура воздуха и другие показатели, характеризующие условия, в которых осуществляется биомеханический контроль.

Формирование шкалы педагогических оценок (Шкалы педагогических оценок не следует путать с измерительными шкалами (шкалами отношений, порядка, наименований)) — дело чрезвычайно трудоемкое. Предположим, нужно разработать шкалу для оценки результатов тестирования детей, подростков, юношей в возрасте 10—18 лет (табл. 5). В каждую из восьми возрастных групп должно войти не менее 100—200 человек. При этом каждый испытуемый должен выполнить упражнение не менее двух раз. Легко подсчитать, что общее число измерений составит несколько тысяч, и, каким бы простым ни было упражнение, сбор необходимых сведений и их обработка отнимут много времени и труда. Затраты, однако, окупаются достоинствами полученной шкалы, относящейся к классу так называемых перцентильных шкал (от английского percent — процент) (рис. 25).

При использовании перцентильной шкалы число баллов, полученных при тестировании, показывает, какой процент своих сверстников опередил испытуемый. Так, в шкале на рис. 25 лучший результат у детей 10 лет равен 26,5 м. Иначе говоря, результат 26,5 м или ниже показали 100% испытуемых. А ребенок, показавший, например, результат 8,5 м, опередил 10% детей этого возраста.

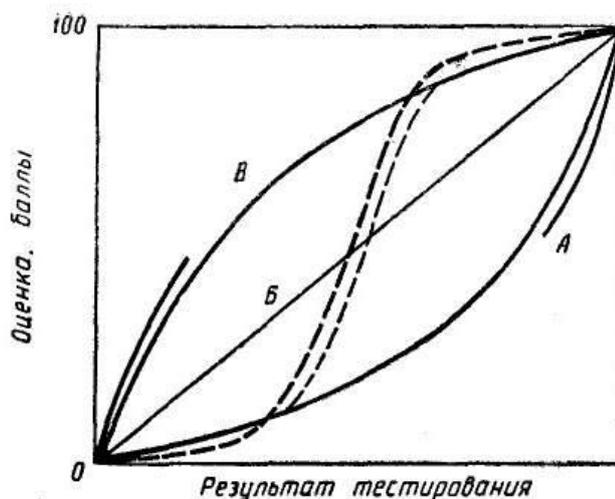


Рис. 26. Наиболее распространенные формы шкалы педагогических оценок:

А — прогрессирующая; Б — пропорциональная; В — регрессирующая; пунктир — сигмовидная. Участки шкал, где наиболее высок прирост оценки (т. е. вознаграждения) за увеличение результата, выделены двойной линией. Например, прогрессирующая шкала стимулирует наивысшие достижения

Важнейшим параметром шкалы является ее форма.

Перцентильные шкалы имеют сигмовидную форму (см. рис. 25). Другие шкалы имеют иную форму (рис. 26). Наиболее распространены пропорциональные, регрессирующие и прогрессирующие шкалы. Регрессирующие шкалы определяют наибольший прирост оценки за повышение результата в области низких результатов, тем самым стимулируется массовость спорта. Прогрессирующие шкалы, напротив, стимулируют стремление спортсменов к наивысшим достижениям. И наконец, в пропорциональной шкале поощрение за прирост мастерства не зависит от уровня показанных результатов.

Тестирование двигательных качеств

Описание методов тестирования, применяемых для биомеханического контроля в физическом воспитании и спорте, начнем с тестов, позволяющих оценить уровень развития двигательных качеств. На этой основе учитель физкультуры или тренер может выбирать из числа известных или самостоятельно создавать тесты, необходимые ему в практической работе.

Биомеханические тесты выносливости позволяют установить, какой объем работы человек может выполнить и как долго может работать без снижения эффективности двигательной деятельности. Например, при беге с постоянной скоростью наступает момент, когда человек не может поддержать исходную длину шага (компенсированное утомление), а спустя еще некоторое время он вынужден снизить скорость (декомпенсированное утомление) (рис. 27). Чем выносливее человек, тем дольше не наступает утомление.

Вместо скорости можно программировать длину дистанции и измерять минимальное время, за которое человек справляется с заданием. Этот тест аналогичен соревновательному упражнению в циклических видах спорта.

Есть и третий вариант теста, когда ограничивается продолжительность упражнения и измеряется преодоленное расстояние. Известно несколько разновидностей этого теста: 60-минутный беговой тест, 7-минутный тест для гребцов, разные варианты теста Купера (беговой, плавательный и т. п.).

Согласно правилу обратимости двигательных заданий все три разновидности теста на выносливость эквивалентны (табл. 6), т. е. при тестировании группы людей наиболее выносливые в одном из этих трех тестов будут наиболее выносливыми и в двух других.

Примечание. Для тестирования выносливости используют не только циклические локомоции, но и другие физические упражнения, поэтому скорость передвижения — частный случай интенсивности мышечной работы, а преодоленное расстояние — частный случай объема выполненной работы.

Тестирование силовых качеств осуществляется либо в упражнениях статического характера, либо в таких общеразвивающих упражнениях, где выполняется локальная или региональная мышечная работа. В первом случае мерой силовых возможностей служит величина проявляемой силы (F_0 на рис. 14) и продолжительность ее удержания. Во втором случае определяется, сколько раз подряд человек может сжать или растянуть пружину динамометра, подтянуться, отжаться и т. п. Конкретных упражнений, в которых оцениваются силовые качества, очень много. Это неудивительно, ведь двигательный аппарат человека включает в себя около 600 мышц, которые по-разному взаимодействуют в различных упражнениях.

**Способы тестирования выносливости,
эквивалентные согласно правилу обратимости
двигательных заданий**

Задается	Измеряется	Вычисляется
Скорость передвижения	Предельное время поддержания скорости	Преодоленное расстояние
v	Δt	$S = v \cdot \Delta t$
Продолжительность упражнения	Предельное расстояние, преодоленное за данное время	Средняя скорость
Δt	S	$v = \frac{S}{\Delta t}$
Дистанция	Минимальное время преодоления дистанции	Средняя скорость
S	Δt	$v = \frac{S}{\Delta t}$

Проявляемая человеком сила зависит от позы, от углов в суставах. Влияние суставного угла на проявляемую силу иллюстрирует рис. 28. Изображенный на нем график показывает, что, например, оптимальный угол в локтевом суставе близок к 80° . В этом случае угол между направлением тяги двуглавой мышцы плеча и костями предплечья близок к 90° .

Вообще говоря, измерение силы можно проводить при любой величине суставного угла. Важно лишь, чтобы он всегда был одним и тем же.

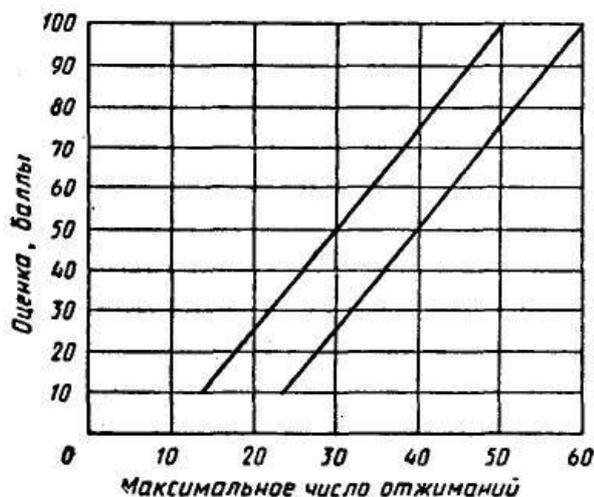


Рис. 29. Шкала для оценивания силовой подготовленности по результатам сгибания и разгибания рук в упоре лежа у людей разного возраста (слева — свыше 30 лет; справа — до 30 лет) (по Johnson, Nelson, переработано)

Общепринятым тестом силовых качеств является подтягивание на перекладине. Но далеко не каждый может подтянуться на высокой перекладине. Поэтому полезен тест, в котором человек выполняет возможно большее число подтягиваний на низкой перекладине (см. рис. 4), и соответствующие педагогические шкалы (табл. 7). С той же целью можно использовать «отжимания» (рис. 29) и другие общедоступные упражнения (некоторые из них описаны в главе 12).

Задание для самоконтроля знаний

Нарисуйте графики, соответствующие цифрам в таблице; к какому типу относятся эти шкалы?

Тесты скоростных качеств делятся на три группы. При тестировании человек должен продемонстрировать:

1) наименьшее латентное время двигательной реакции, т. е. временной интервал между световым или звуковым сигналом («стимулом») и началом двигательного действия;

2) наибольшую скорость одиночного движения (рукой, ногой и т. д.);

3) наибольший темп циклических движений (например, боксерских ударов) или наибольшую скорость передвижения (например, в спринтерском беге).

В каждой группе бесконечное множество тестов. Какой из них выбрать? Отвечать на этот вопрос стало легче после того, как было установлено, что результаты в тестах одной и той же группы тесно взаимосвязаны, а результаты в тестах из разных групп не связаны между собой. Например, человек может с большим запаздыванием реагировать на сигнал стартера, но развивать высокую скорость на дистанции. А у другого человека может быть высокая скорость одиночного движения, но сравнительно низкая скорость бега. Но если кто-то демонстрирует высокую скорость одиночного движения рукой, то и по скорости одиночного движения ногой он опередит многих своих сверстников.

Практический совет, вытекающий из сказанного, состоит в том, что при тестировании скоростных качеств достаточно измерить три показателя (по одному из каждой группы).

Тестирование скоростно-силовых качеств осуществляется в упражнениях, позволяющих продемонстрировать и силу, и быстроту. Для этого издавна использовали прыжки в высоту и в длину с места. Одна из шкал, применяемых для оценки результатов такого тестирования, содержится в таблице 8.

Даже такой простой показатель скоростно-силовых качеств, как высота вертикального прыжка с места, приносит большую пользу. Так, Каунсилмен предлагает использовать его для выявления прироченных спринтеров и стайеров в плавании. Пловцам-мужчинам, прыгающим на высоту 41 см и ниже, он рекомендует специализироваться на стайерских дистанциях. А тем, кто прыгает выше 55 см,— на спринтерских.

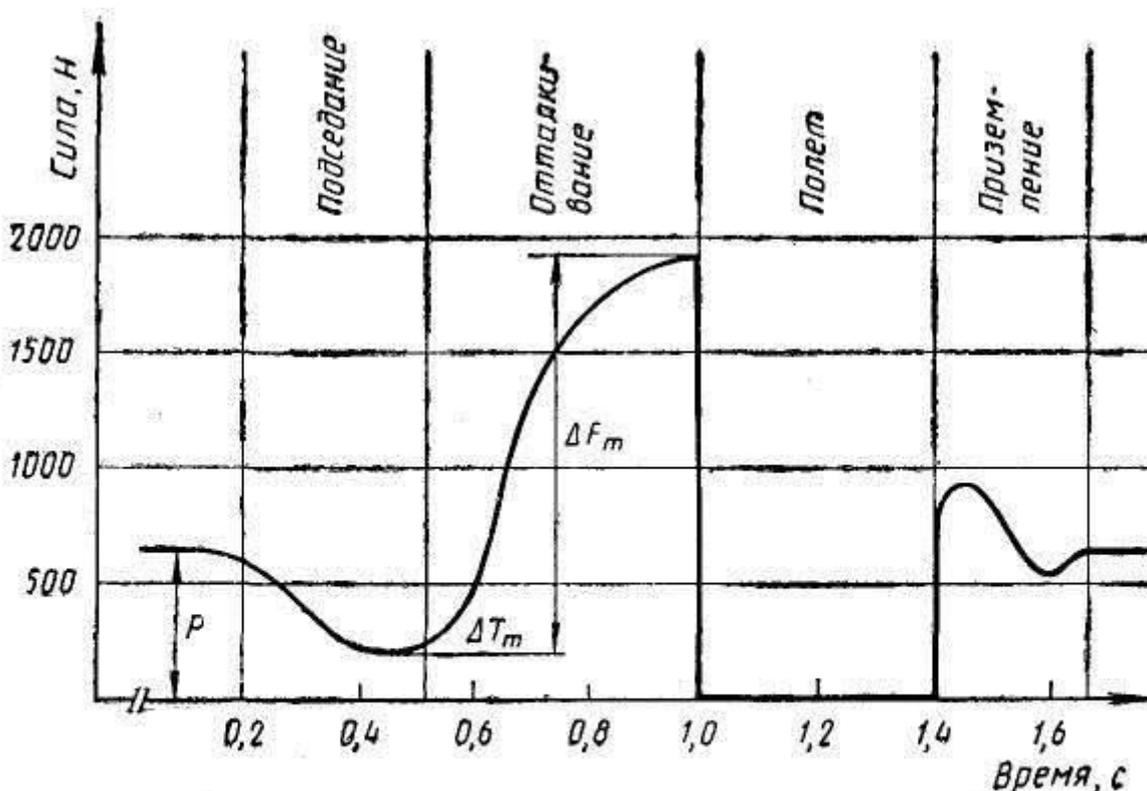


Рис. 31. Динамограмма прыжка вверх с места (по В. А. Петрову, Ю. А. Гагину, Miller, Nau с соавт., переработано); коэффициент реактивности равен $\frac{\Delta F_m}{\Delta T_m P}$, где P — вес тела

Для более глубокого анализа скоростно-силовых качеств регистрируют динамограмму (Динамограммой (от греческого *dynamis* — сила) называется график изменения проявляемой силы во времени) прыжка или другого «взрывного» упражнения и вычисляют градиент силы (т. е. отношение приращения силы к интервалу времени, за которое это приращение произошло).

Градиент силы неодинаков на разных участках динамо-граммы. Обычно в начале движения он больше, чем в конце. Поэтому вычисляют скоростно-силовой индекс — частное от деления разности между максимальным и минимальным значениями проявляемой силы на величину временного интервала, за который это изменение произошло (рис. 30). Чем выше скоростно-силовая подготовленность, тем больше скоростно-силовой индекс, так как большая сила достигается за меньшее время.

При выполнении многих физических упражнений приходится преодолевать силу тяжести своего тела. В этих случаях наиболее информативный показатель скоростно-силовых качеств — не скоростно-силовой индекс, а коэффициент реактивности. Коэффициент реактивности равен скоростно-силовому индексу, деленному на вес тела. Пример подготовки динамограммы к вычислению коэффициента реактивности приведен на рис. 31.

Тестирование гибкости чаще всего связано с измерением углов между звеньями тела (рис. 32). Делается это гониометрами (угломерами). Существуют и другие методы контроля за гибкостью (рис. 33).

Гибкость занимает особое положение среди двигательных качеств. Тем, кто занимается в группах здоровья и руководит ими, особенно важно помнить, что «потеря гибкости равносильна началу старости». Для ежедневного контроля за гибкостью рекомендуются наклоны вперед с прямыми ногами, выполняемые на ступеньке, к которой вертикально приставлена линейка с сантиметровыми делениями (рис. 34). Гибкость

оценивается расстоянием от кончиков пальцев руки до опоры. 1 см на линейке соответствует одному очку. Нормальной считается гибкость, оцениваемая в ноль очков; в этом случае испытуемый достает кончиками пальцев до опоры. Если, не сгибая коленей, удастся дотянуться еще ниже, гибкость оценивается тем или иным положительным числом очков. У человека, не дотянувшегося до опоры, оценка гибкости отрицательна. Например, минус 25 очков получает тот, у кого в положении наклона концы пальцев на 25 см выше опоры.

Различают активную и пассивную гибкость. Активную гибкость человек демонстрирует сам, без посторонней помощи. Пассивная гибкость проявляется при приложении внешней силы. Понятно, что пассивная гибкость выше активной.