

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

К. К. Бондаренко, А. Е. Бондаренко

БИОМЕХАНИКА

Практическое пособие
для студентов специальности 1-03 02 01 «Физическая культура»

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2019

УДК 796.012(076)

ББК 75.00я73

Б811

Рецензенты:

канд. пед. наук Г. В. Новик;
канд. пед. наук С. В. Шеренда

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
учреждения образования «Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

Бондаренко, К. К.

Б811 Биомеханика : практическое пособие / К. К. Бондаренко,
А. Е. Бондаренко ; Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. –
Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2019. – 45 с.
ISBN 978-985-577-605-6

Настоящее практическое пособие содержит лабораторные работы для студентов по дисциплине «Биомеханика», описание содержания и последовательности их выполнения. Описаны наиболее простые и информативные способы обработки полученных результатов. Приводятся также необходимые теоретические сведения, которые могут быть использованы студентами при выполнении работы.

Издание предназначено студентам специальности 1-03 02 01 «Физическая культура».

УДК 796.012(076)
ББК 75.00я73

ISBN 978-985-577-605-6

© Бондаренко К. К., Бондаренко А. Е., 2019
© Учреждение образования «Гомельский
государственный университет
имени Франциска Скорины», 2019

Оглавление

Предисловие.....	4
Лабораторная работа 1. Определение положения общего центра масс тела аналитическим способом (сложение моментов сил тяжести по теореме Вариньона).....	5
Лабораторная работа 2. Определение общего центра масс тела графическим способом (сложением сил масс звеньев).....	9
Лабораторная работа 3. Определение массы сегмента и центра массы сегмента расчетным методом (по В. Н. Селуянову).....	12
Лабораторная работа 4. Определение момента инерции тела расчётным способом.....	16
Лабораторная работа 5. Определение временных характеристик движения.....	20
Лабораторная работа 6. Определение угловых скоростей и ускорений продольной оси тела.....	23
Лабораторная работа 7. Индексное описание позы тела человека и его движения.....	28
Лабораторная работа 8. Определение управляющей силы в физическом упражнении.....	33
Лабораторная работа 9. Определение кинетического момента (момента количества движения) тела человека.....	38
Лабораторная работа 10. Определение управляющих моментов сил в физическом упражнении.....	40
Лабораторная работа 11. Определение полезной механической работы и её средней мощности	42
Литература.....	44
Приложение А. Основные правила определения суставных углов при описании позы тела человека с помощью индексного метода.....	45

Предисловие

Биомеханика как учебная дисциплина имеет большое общеобразовательное и специальное значение для студентов и специалистов в области физической культуры. Она занимает одно из главных мест в ряду других дисциплин учебного плана факультетов физической культуры, формируя общую и профессиональную культуру студентов — будущих педагогов, тренеров.

Настоящее практическое пособие содержит лабораторные работы для студентов по дисциплине «Биомеханика», описание содержания и последовательности их выполнения. Приводятся также необходимые теоретические сведения, которые могут быть использованы студентами при выполнении работы. Описаны наиболее простые и информативные способы обработки полученных результатов.

Содержание лабораторных работ предполагает преемственность. Ввиду этого нельзя нарушать последовательность их выполнения, которая диктуется принадлежностью работ к тому или иному разделу теоретической части курса. Лабораторные работы предусматривают исследование кинематического анализа движения и его динамических характеристик, и они также должны быть выполнены в предлагаемой последовательности. Результаты лабораторных работ оформляются в виде протоколов.

Практическое пособие предназначено для проведения лабораторных занятий по дисциплине «Биомеханика» для студентов специальности 1-03 02 01 «Физическая культура».

Лабораторная работа 1

Определение положения общего центра масс тела аналитическим способом (сложение моментов сил тяжести по теореме Вариньона)

Теоретические сведения

Центром масс (ЦМ) называется точка, где пересекаются линии всех сил, приводящие тело к поступательному движению и не вызывающие его вращения.

В поле гравитации (когда действует сила тяжести) центр масс совпадает с центром тяжести.

Положение общего центра масс тела определяется там, где находятся центры масс отдельных звеньев. Это зависит от позы и от расположения частей тела относительно друг друга.

Центр масс туловища при положении тела в фас находится на прямой, соединяющей середины линий, проведенных между плечевыми и тазобедренными суставами, на профильном снимке – на прямой, соединяющей центры плечевого и тазобедренного суставов.

Центр масс головы находится в области турецкого седла клиновидной кости. Проекция ЦМ при положении в анфас – на переносице между бровями, при профильном положении – сбоку на 3–3,5 см выше наружного слухового прохода (его отмечают точкой непосредственно над слуховым проходом).

Эмпирически установлено, что центр тяжести кисти всегда находится в области пястно-фалангового сочленения, в головке третьего пальца.

Проекции центров суставов (концы звеньев) верхних и нижних конечностей: а) плечо: большой бугор головки плечевой кости (проксимальный конец) – наружный надмыщелок (дистальный конец); б) предплечье: тот же наружный надмыщелок (проксимальный конец) – шиловидный отросток локтевой кости (дистальный конец); в) бедро: большой вертел бедренной кости (проксимальный конец) – наружный надмыщелок той же кости (дистальный конец); г) голень: тот же наружный надмыщелок (проксимальный конец) – наружная лодыжка большеберцовой кости (дистальный конец); д) стопа: второй палец спереди в области сустава

между основным и средним (дистальный конец) – пяточный бугор (проксимальный конец).

Известно, что для сохранения равновесия любого тела должно быть равенство действующих на него сил: силы тяжести и силы реакции опоры. Для характеристики условий равновесия человеческого тела необходимо определение точки приложения к нему силы тяжести, то есть общего центра тяжести (общего центра масс).

В биомеханике труда для определения общего центра масс пользуются математическими расчетами. Для нахождения центра масс тела расчетным путем нужно знать веса отдельных звеньев тела и расположение их центров масс. Для определения веса звеньев тела достаточно пользоваться данными Фишера о весе различных звеньев тела по отношению к общему весу тела человека, принятому за 100 %.

Относительные массы звеньев тела

Масса звена в % к общей массе тела:

- голова – 7,
- туловище – 43,
- бедро – 12,
- голень – 5,
- стопа – 2,
- плечо – 3,
- предплечье – 2,
- кисть – 1.

Для определения центров масс отдельных звеньев тела на фотоснимке и их проекций пользуются данными Фишера об относительных расстояниях центров масс каждого звена от их проксимальных концов, высчитанными при условии, что вся длина звена принята за единицу.

Относительные расстояния центров тяжести звеньев от их проксимальных концов:

- плечо – 0,47,
- голень – 0,42,
- предплечье – 0,42,
- туловище – 0,44,
- бедро – 0,44,
- стопа (ось от пяточного бугра ко 2-му пальцу) – 0,44.

Цель работы: научиться определять положение общего центра масс (ОЦМ) сложением моментов сил тяжести.

Задача: определить местонахождение ОЦМ при заданной позе.

Материалы и оборудование: фотография позы, угольник.

Ход работы

1. Отмечаем точками на фотографии (рисунок 1) проекции центров суставов.
2. Соединяем вышеобозначенные точки прямыми линиями – получаем проекции длинных звеньев тела.
3. Для нахождения местоположения центра масс каждого звена, измеряем его длину (расстояние от сустава до сустава). Полученную величину принимаем за единицу и, пользуясь данными Фишера, составляем пропорцию. Если, например, на фотоснимке длина бедра у человека 40 мм, то записываем: $40 : 1 = x : 0,44$. В результате $x = 17,6$ мм. Откладываем это значение от проксимального конца звена – и получаем местоположение его ЦМ.

Примечание – Проксимальным концом туловища является проекция центра тазобедренного сустава, для стопы — пяточный бугор; центр тяжести головы и кисти наносят непосредственно, как указано выше.

4. На фотографии (рисунок 1) произвольно в стороне от фигуры проводим оси координат XOY .

5. Из центров масс звеньев опускаем перпендикуляры на оси координат OX и OY и обозначаем их соответствующими переменными. Следует учитывать, что перпендикуляр, опущенный из ЦМ звена на, например, ось OX , обозначаем переменными $y_1, y_2, y_3...$ так как переменной обозначается не конкретная точка, а расстояние от ЦМ до оси, которое возможно отложить только на оси Y . Расстояния от соответствующего звена до оси X или Y записываем в миллиметрах в таблицу 1.

6. Находим значения моментов сил звеньев тела относительно осей координат как произведение относительных масс звеньев (m) на расстояние от ЦМ звена до соответствующей оси. Результаты заносим в таблицу.

7. Составляем уравнения моментов сил относительно осей координат \underline{X} и \underline{Y} , используя способ сложения моментов сил, основанный на теореме Вариньона: «Сумма моментов сил относительно любого центра равна моменту суммы этих сил (их равнодействующей) относительно того же центра». Например: если M – масса всего тела, а \underline{X} и \underline{Y} – искомые расстояния от общего центра масс тела от осей, уравнения будут выглядеть так:

$$\begin{aligned} MX &= m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3 + \dots + m_nx_n; \\ MY &= m_1y_1 + m_2y_2 + m_3y_3 + \dots + m_ny_n. \end{aligned} \quad (1.1)$$

Преобразуя выражение, получим:

$$\begin{aligned} X &= \frac{\sum m_nx_n}{M}, \\ Y &= \frac{\sum m_ny_n}{M}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

8. Откладываем полученные значения на соответствующих осях координат (\underline{X} – на оси абсцисс, \underline{Y} – на оси ординат). Из данных точек восстанавливаем перпендикуляры. Пересечение перпендикуляров определяет местоположение ОЦМ тела при заданной позе.

Таблица 1 – Таблица данных расчета моментов сил

Звенья тела	m (%)	x	y	$m \cdot x$	$m \cdot y$
1	2	3	4	5	6
Голова	7				
Туловище	43				
Плечо правое	3				
Плечо левое	3				
Предплечье правое	2				
Предплечье левое	2				
Кисть правая	1				
Кисть левая	1				
Бедро правое	12				
Бедро левое	12				
Голень правая	5				
Голень левая	5				
Стопа правая	2				
Стопа левая	2				

В качестве отчета представим обработанную фотографию позы. Опустив на фотографии перпендикуляр из найденного центра тяжести, анализируем устойчивость позы.

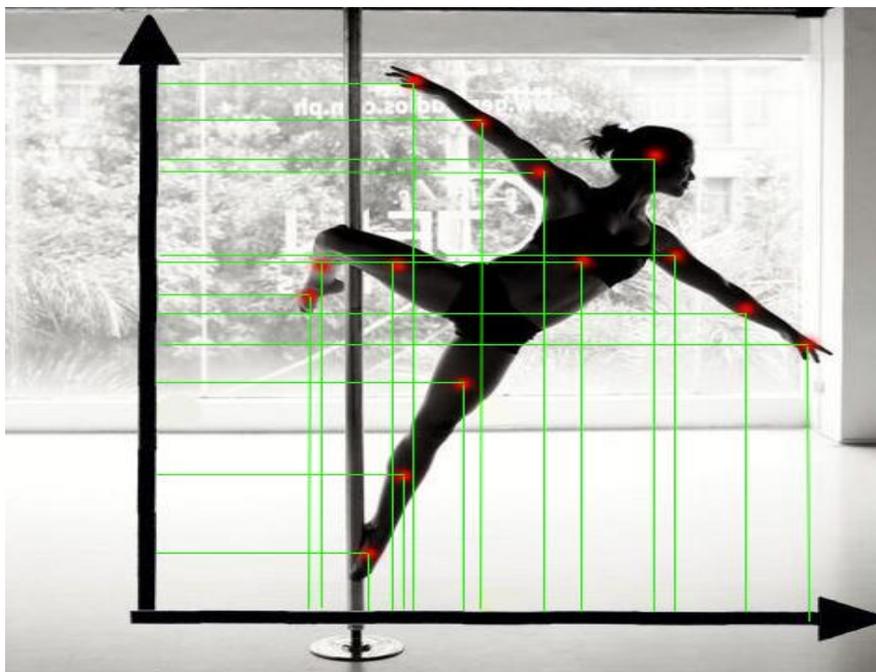


Рисунок 1 – Определение ОЦМ туловища аналитическим способом

Лабораторная работа 2

Определение общего центра масс тела графическим способом (сложением сил масс звеньев)

Теоретические сведения

Центр масс звена — это воображаемая точка, к которой приложена равнодействующая сил тяжести всех частиц звена. Опытным путем (О. Фишер, Н. А. Бернштейн) были определены средние данные о весе звеньев тела и о положении их центров тяжести. Если принять вес тела за 100 %, то вес каждого звена может быть выражен в относительных единицах (в %) (таблица 2). При выполнении расчетов не обязательно знать абсолютные веса (в кг) ни всего тела, ни каждого звена. Центры тяжести звеньев определены или по анатомическим ориентирам (голова, кисть), или по относительному расстоянию ЦМ от проксимального сустава (радиус центра масс –

часть всей длины звена конечностей), или по пропорции (туловище, стопа).

Для определения равнодействующей двух параллельных сил соединяют прямой линией точки их приложения. При сложении сил масс двух звеньев эта линия соединяет их центры масс. На этой линии располагается точка приложения суммы двух сил (равнодействующей), т. е. общий центр масс двух звеньев.

Например, общий центр масс плеча и предплечья расположен на линии, соединяющей их ЦМ. Так как масса плеча составляет 3 %, а предплечья – 2 % от всей массы тела, то эту линию следует разделить на 5 частей ($2+3=5$). ЦМ двух звеньев расположен ближе к более тяжелому (соотношение отрезков линии 2:3, считая от плеча), т. е. имеет обратную зависимость соотношения масс звеньев.

Общий центр масс всей руки расположен на линии, соединяющей общий центр масс плеча и предплечья с центром масс кисти. Сумма масс плеча и предплечья составляет 5 %, а кисти – 1 % от всей массы тела, следовательно, надо эту линию разделить на 6 частей ($5+1$).

Таблица 2 – Относительная масса и расположение центров масс звеньев тела

Название звена	Относительная масса в %	Расположение ЦМ звена
Голова	7	3–3,5 см выше наружного слухового отверстия
Туловище	43	На линии между серединами осей плечевых и тазобедренных суставов на расстоянии 0,44 от плечевой оси
Плечо	3	На расстоянии 0,47 от большого бугра головки плечевой кости
Предплечье	2	На расстоянии 0,42 от наружного надмыщелка плечевой кости
Кисть	1	Пястнофаланговый сустав 3-го пальца
Бедро	12	На расстоянии 0,44 от большого вертела бедренной кости
Голень	5	На расстоянии 0,42 от наружного надмыщелка бедренной кости
Стопа	2	На линии между пяточным бугром и 2-м пальцем на расстоянии 0,44 от пятки

ЦМ звеньев расположен ближе к более тяжелому ЦМ (соотношение отрезков линии 1:5, считая от ЦМ плеча и предплечья), т. е. имеет обратную зависимость соотношения масс звеньев (рисунок 2).

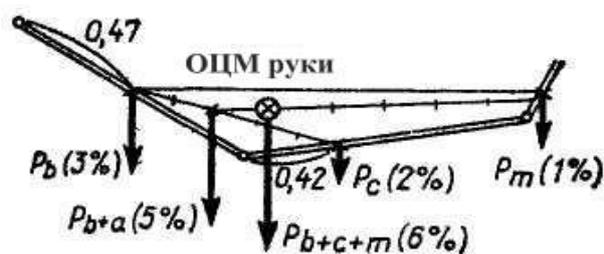


Рисунок 2 – Определение общего центра масс руки

Цель работы: научиться определять положение ОЦМ сложением сил масс звеньев.

Задачи:

- научиться определять положение центров масс звеньев (ЦМ);
- научиться определять положение общего центра масс тела (ОЦМ).

Ход работы

1. Отмечаем на фотографии позы спортсмена точками проекции суставов, пользуясь анатомическими данными.

2. Соединяем точки проекции суставов прямыми линиями, получаем проекции длинных звеньев.

3. Рассчитываем местоположение центров масс звеньев, измерив длину каждого длинного звена и умножив ее на соответствующее относительное расстояние от проксимального конца до ЦМ. Откладываем полученные результаты от проксимальных концов звеньев.

4. Находим сначала ЦМ сил масс плеча и предплечья (векторы сил рисовать не нужно, следует только помнить относительные массы звеньев); далее, прибавив массу кисти, находим ОЦМ всей руки.

5. Также последовательно суммируем массы звеньев ноги. Если положение симметричное, то, значит, ЦМ обеих рук расположены одинаково, так же, как и обеих ног. Определяя ОЦМ всех конечностей, это можно еще не учитывать, но, прибавляя к их массе массу туловища или головы, нельзя забывать удвоить массу конечностей.

6. Соединяем ОЦМ руки и ОЦМ ноги. ОЦМ конечностей расположен ближе к более тяжелому ОЦМ (соотношение отрезков линии 6:19), считая от ОЦМ ноги, т. е. имеет обратную зависимость соотношения масс звеньев.

7. Находим ОЦМ головы и туловища (50 % веса тела).

8. Соединяем ОЦМ головы и туловища, а также ОЦМ всех конечностей (другая половина веса – учитываем симметричное расположение конечностей, удваиваем их). Названные две точки соединяем отрезком, который делим пополам. В этой точке и расположен ОЦМ тела (рисунок 3).

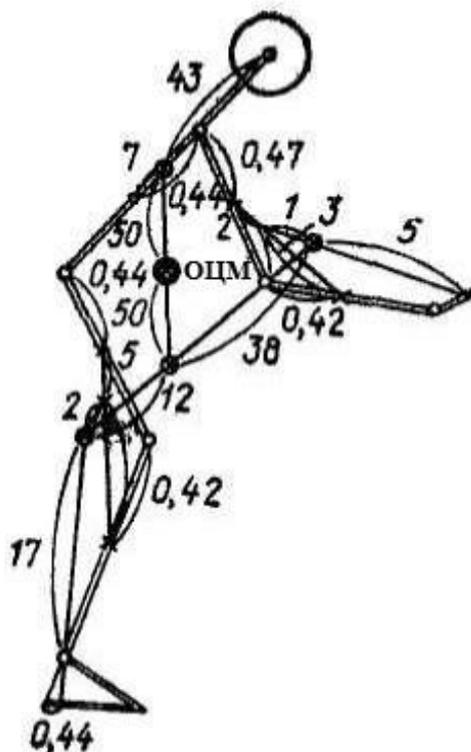


Рисунок 3 – Схема расчета ОЦМ позы спортсмена

Лабораторная работа 3

Определение массы сегмента и центра массы сегмента расчетным методом (по В. Н. Селуянову)

Теоретические сведения

Двигательный аппарат человека – это самодвижущийся механизм, состоящий из более 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. Звеном 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.

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. В человеческом теле около 70 звеньев. Но столь подробного описания геометрии масс чаще всего и не требуется. Для решения большинства практических задач достаточно 14-звенной модели человеческого тела. Понятно, что в 14-звенной модели некоторые звенья состоят из нескольких элементарных звеньев. Поэтому такие укрупненные звенья правильнее называть сегментами.

В. Н. Селуянов установил, что массы сегментов тела можно определить с помощью следующего уравнения: $m_x = B_0 + B_1 \cdot m + B_2 \cdot H$, 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 (таблицы 3 и 4). 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 (mv);

- определить кинетический момент, равный произведению момента инерции тела на угловую скорость; 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.

В таблице 3 представлены коэффициенты уравнений

множественной регрессии для вычисления массы сегментов тела по длине тела (H) и массе тела (m).

Формула расчета массы сегмента:

$$m_x = B_0 + B_1 m + B_2 H. \quad (3.1)$$

Таблица 3 – Коэффициенты уравнения регрессии для определения массы сегментов тела (для мужчин)

Сегмент	B_0	B_1	B_2	R	σ
1	2	3	4	5	6
1. Стопа	-0,829	0,0077	0,0073	0,702	0,101
2. Голень	-1,592	0,03616	0,0121	0,872	0,219
3. Бедро	-2,649	0,1463	0,0137	0,891	0,721
4. Кисть	-0,1165	0,0036	0,00175	0,516	0,0629
5. Предплечье	0,3185	0,01445	-0,00114	0,786	0,101
6. Плечо	0,250	0,03012	-0,0027	0,834	0,178
7. Голова	1,296	0,0171	0,0143	0,591	0,322
8. Верхняя часть туловища	8,2144	0,1862	-0,0584	0,798	1,142
9. Средняя часть туловища	7,181	0,2234	-0,0663	0,828	1,238
10. Нижняя часть туловища	-7,498	0,0976	0,04896	0,743	1,02

Примечание – R – множественный коэффициент корреляции,
 δ – стандартная ошибка уравнения регрессии.

Таблица 4 – Коэффициенты уравнения регрессии для определения массы сегментов тела (для женщин)

Сегмент	B_0	B_1	B_2	R	σ
1	2	3	4	5	6
1. Стопа	-1,207	-0,0175	0,0057	0,71	0,11
2. Голень	-0,436	-0,011	0,0238	0,42	0,36
3. Бедро	5,185	0,183	-0,042	0,73	0,81
4. Кисть	-0,116	0,0017	0,002	0,48	0,03
5. Предплечье	0,295	0,009	0,0003	0,38	0,11
6. Плечо	0,206	0,0053	0,0066	0,27	0,21
7. Голова	2,388	-0,001	0,015	0,24	0,49
8. Верхняя часть туловища	-16,593	0,140	0,0995	0,64	1,47
9. Средняя часть туловища	-2,741	0,031	0,056	0,45	1,09
10. Нижняя часть туловища	-4,908	0,124	0,0272	0,61	0,9

Примечание – R – множественный коэффициент корреляции,
 δ – стандартная ошибка уравнения регрессии.

Формула расчета расстояния до центра масс сегмента:

$$l_x = B_0 + B_1m + B_2H. \quad (3.2)$$

Всё, что поясняет таблицу, приводится в самой таблице.

Таблица 5 – Коэффициенты уравнения для определения положения центра масс сегмента на продольной оси

Сегменты	Коэффициенты уравнения			Расстояния от проксимального конца (см)
	B_0	B_1	B_2	
1	2	3	4	5
1. Стопа	3,767	0,065	0,033	
2. Голень	-6,05	-0,039	0,142	
3. Бедро	-2,42	0,038	0,135	
4. Кисть	4,11	0,026	0,033	
5. Предплечье	0,192	-0,028	0,093	
6. Плечо	1,67	0,03	0,054	
7. Голова	8,357	-0,0025	0,023	
8. Верхняя часть туловища	3,32	0,0076	0,047	
9. Средняя часть туловища	1,398	0,0058	0,045	
10. Нижняя часть туловища	1,182	0,0018	0,0434	

Цель работы: освоить методику определения массы сегментов тела.

Задания

1. Вычислить массу сегментов тела, пользуясь таблицами 3 или 4, исходя из собственной массы тела и роста.
2. Вычислить массы сегментов для противоположного пола с теми же показателями массы тела и роста.
3. Сравнить распределение массы для женщин и мужчин. Сделать выводы.
4. Вычислить расстояние до центра масс сегмента от его проксимального конца (l), пользуясь таблицей 5.

Лабораторная работа 4

Определение момента инерции тела расчётным способом

Теоретические сведения

Момент инерции – это мера инертности тела при вращательном движении. Величина момента инерции тела зависит не только от количества вещества в теле, т. е. массы, но и от того, как эта масса распределена относительно оси вращения. Момент инерции тела относительно оси – скалярная величина, равная сумме произведений масс всех точек тела на квадраты их расстояний от этой оси:

$$I_{\alpha} = \sum m_n r_n^2 . \quad (4.1)$$

Тело человека можно представить как систему подвижных звеньев с массами, определяемыми по таблице Фишера. Например, при выполнении гимнастом большого оборота на перекладине звенья тела поворачиваются не только относительно оси снаряда – перекладины (рисунок 4), но и относительно своего центра масс.

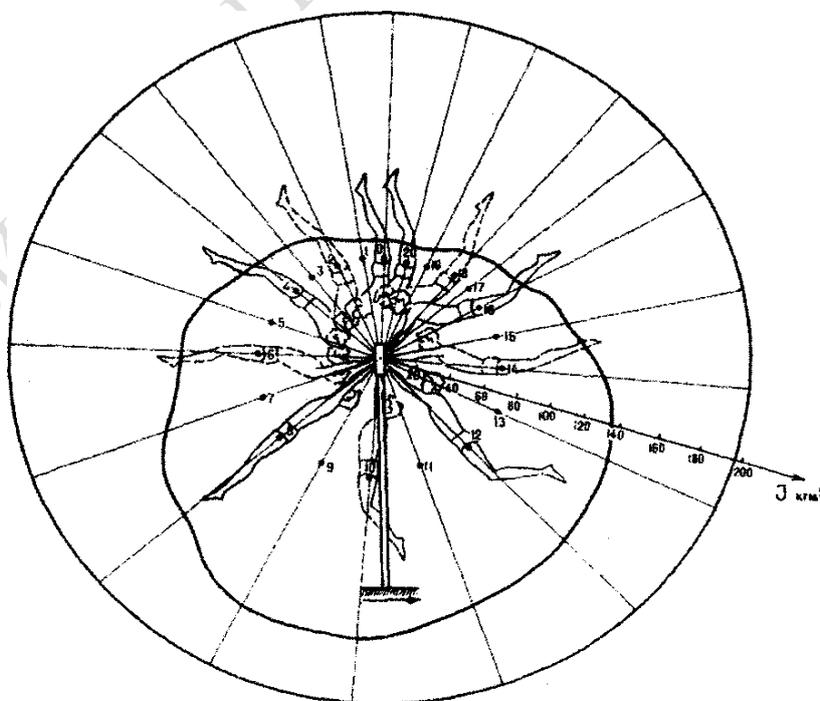


Рисунок 4 – Перемещение звеньев тела относительно оси вращения

Как известно из механики, момент инерции тела относительно данной оси, например, оси перекладины, равен моменту инерции относительно оси, ей параллельной, проходящей через ЦМ тела, сложенному с произведением массы всего тела на квадрат расстояния между осями:

$$I_a = I_c + mr^2. \quad (4.2)$$

Для определения момента инерции тела человека как системы звеньев необходимо знать моменты инерции отдельных частей тела относительно осей, проходящих через ЦМ этих звеньев, и расстояния от центров тяжести звеньев до оси вращения. При определении моментов инерции звеньев делается допущение, что звенья – это цилиндры с однородно распределенными массами.

Момент инерции цилиндра относительно оси, проходящей через ЦМ, равен:

$$I_c = \frac{1}{12} ml^2. \quad (4.3)$$

Соответственно:

$$I_2 = \frac{1}{12} ml^2 + mr^2 = \left(\frac{l^2}{12} + r^2 \right). \quad (4.4)$$

Заменим выражение в скобках коэффициентом k , который берется из таблицы, рассчитанной В. А. Петровым.

Порядок выполнения работы

1. Определить масштаб фигуры на фотографии или промере.
2. Разделить тело на определённое число частей, исходя из характера позы спортсмена. Подготовить таблицу расчёта, подобно таблице 6.
3. Измерить длину части тела (L) и с учётом масштаба записать в натуральном размере в графу 3 таблицы 6 напротив измеренного звена. Повторить эту операцию для всех звеньев.
4. Измерить с учётом масштаба фотографии или промера расстояние от центра тяжести звена до оси ($г$) и записать в соответствующую графу столбца 4 таблицы 6.

5. Определить по таблице В. А. Петрова (таблица 7) значение коэффициента k для каждой части тела, находя его на пересечении значений r и L , и записать в графу 5.

6. Найти моменты инерции частей тела как произведение $m \cdot k$ и записать в графу 6.

7. Найти общий момент инерции тела как сумму моментов инерции частей тела:

$$I_{\text{тела}} = \sum m_n k_n. \quad (4.5)$$

Примечания: 1) для данной работы используется фотография или промер спортсмена, находящегося в безопорном положении;

2) центр масс тела находится в кисти правой (или левой) руки спортсмена.

Таблица 6 – Расчет момента инерции частей тела спортсмена

Часть тела	Масса - m (кг)	Длина части тела – L (м)	Расстояние до оси – r (м)	Коэффициент – k	Момент инерции тела – I
1	2	3	4	5	6
Голова					
Туловище					
Правое бедро					
Левое бедро					
Правые голень – стопа					
Левые голень – стопа					
Правая рука					
Левая рука					

Таблица 7 – Значение коэффициента K , на который следует умножить массу, чтобы получить момент инерции звена (кгм^2)

Метры r	Длина звена в метрах l																			
	0	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20				
0,0	0,00	0,008	0,010	0,013	0,017	0,020	0,025	0,030	0,035	0,041	0,047	0,053	0,068	0,083	0,101	0,120				
0,1	0,01	0,018	0,020	0,023	0,027	0,031	0,035	0,040	0,045	0,051	0,057	0,063	0,078	0,093	0,111	0,130				
0,15	0,02	0,031	0,033	0,036	0,040	0,044	0,048	0,053	0,058	0,064	0,070	0,076	0,091	0,106	0,124	0,143				
0,20	0,04	0,048	0,055	0,053	0,057	0,061	0,065	0,070	0,075	0,081	0,087	0,093	0,108	0,123	0,141	0,160				
0,25	0,06	0,068	0,070	0,073	0,077	0,081	0,085	0,090	0,095	0,101	0,107	0,113	0,128	0,143	0,161	0,180				
0,30	0,09	0,098	0,100	0,103	0,107	0,111	0,115	0,120	0,125	0,131	0,137	0,143	0,158	0,173	0,191	0,210				
0,35	0,12	0,128	0,130	0,133	0,137	0,141	0,145	0,150	0,155	0,161	0,167	0,173	0,188	0,203	0,221	0,240				
0,40	0,16	0,168	0,170	0,173	0,177	0,181	0,185	0,190	0,195	0,201	0,207	0,213	0,228	0,243	0,261	0,280				
0,45	0,20	0,208	0,210	0,213	0,217	0,221	0,225	0,230	0,235	0,241	0,247	0,253	0,268	0,283	0,301	0,320				
0,50	0,25	0,258	0,260	0,263	0,267	0,271	0,275	0,280	0,285	0,291	0,297	0,303	0,318	0,333	0,351	0,370				
0,55	0,30	0,308	0,310	0,313	0,317	0,321	0,325	0,330	0,335	0,341	0,347	0,353	0,368	0,383	0,401	0,420				
0,60	0,36	0,368	0,370	0,373	0,377	0,381	0,385	0,390	0,395	0,401	0,407	0,413	0,428	0,443	0,461	0,470				
0,65	0,42	0,428	0,430	0,433	0,437	0,441	0,445	0,450	0,455	0,461	0,467	0,473	0,488	0,503	0,521	0,540				
0,70	0,49	0,498	0,500	0,503	0,507	0,511	0,515	0,520	0,525	0,531	0,537	0,543	0,558	0,563	0,591	0,610				
0,75	0,56	0,568	0,570	0,573	0,577	0,581	0,585	0,590	0,595	0,601	0,607	0,613	0,628	0,643	0,661	0,680				
0,80	0,64	0,648	0,650	0,653	0,657	0,661	0,665	0,670	0,675	0,681	0,687	0,693	0,708	0,723	0,741	0,760				
0,85	0,72	0,728	0,730	0,733	0,737	0,741	0,745	0,750	0,755	0,761	0,767	0,773	0,788	0,803	0,821	0,840				
0,90	0,81	0,818	0,820	0,823	0,827	0,831	0,835	0,840	0,845	0,851	0,857	0,863	0,878	0,893	0,911	0,930				
0,95	0,90	0,908	0,910	0,913	0,917	0,921	0,925	0,930	0,935	0,941	0,947	0,953	0,968	0,983	1,001	1,020				
1,00	1,00	1,008	1,010	1,013	1,017	1,021	1,025	1,030	1,035	1,041	1,047	1,053	1,068	1,083	1,101	1,120				
1,10	1,21	1,218	1,220	1,223	1,227	1,231	1,235	1,240	1,245	1,251	1,257	1,263	1,278	1,293	1,311	1,330				
1,20	1,44	1,448	1,450	1,453	1,457	1,461	1,465	1,470	1,475	1,481	1,487	1,493	1,508	1,523	1,541	1,560				
1,30	1,69	1,698	1,700	1,703	1,707	1,711	1,715	1,720	1,725	1,731	1,737	1,743	1,758	1,773	1,791	1,810				
1,40	1,96	1,968	1,970	1,973	1,977	1,981	1,985	1,990	1,995	2,001	2,007	2,013	2,028	2,043	2,061	2,080				
1,50	2,25	2,258	2,260	2,263	2,267	2,270	2,275	2,280	2,285	2,291	2,297	2,303	2,318	2,333	2,351	2,370				
1,60	2,56	2,568	2,570	2,573	2,577	2,581	2,585	2,590	2,595	2,601	2,607	2,613	2,628	2,643	2,661	2,680				
1,70	2,89	2,898	2,900	2,903	2,907	2,911	2,915	2,920	2,925	2,931	2,937	2,943	2,958	2,973	2,991	3,010				
1,80	3,24	3,248	3,250	3,253	3,257	3,261	3,265	3,270	3,275	3,281	3,287	3,293	3,308	3,323	3,341	3,360				
1,90	3,61	3,618	3,620	3,623	3,627	3,631	3,635	3,640	3,645	3,651	3,657	3,663	3,678	3,693	3,711	3,720				
2,00	4,00	4,008	4,010	4,013	4,017	4,021	4,025	4,030	4,035	4,041	4,047	4,053	4,068	4,083	4,101	4,120				

Расстояние от оси вращения до центра звена, l

Лабораторная работа 5

Определение временных характеристик движения

Теоретические сведения

Длительность движения (в целом его частей или фаз) — разность моментов времени окончания и начала движения (с):

$$\Delta T = t_1 - t_0. \quad (5.1)$$

Темп движений — число движений в единицу времени:

$$N = \frac{1}{\Delta t}. \quad (5.2)$$

Временной ритм движений — соотношение промежутков времени отдельных частей движения, т. е. соотношение времени фаз в целом движении: $\Delta t_1 : \Delta t_2 \dots$

Расчет временных характеристик проводится по импульсной фотографии, кинограмме или по видеоматериалу с учетом частоты видеосъемки. Длительность одного временного интервала при выбранной частоте будет вычисляться по формуле:

$$\Delta t = t_1 - t_0 = \frac{1}{f} - \frac{0}{f} = \frac{1}{f}. \quad (5.3)$$

Движение начинается из определенного исходного положения, которое принимают за нулевое. Кадры, ограничивающие части движения, являются концами фаз. Их отделяет от начала движения промежуток времени — Δt . При этом длительность фазы находят по разности промежутков времени начала и конца фазы. Например, начинается фаза на 28-м кадре, а заканчивается на 50-м. Длительность фазы определяется с учетом частоты видеосъемки следующим образом:

$$\Delta t_{\varphi} = t_{\text{кон.}} - t_{\text{нач.}} = \frac{50}{f} - \frac{28}{f} = \frac{22}{f}. \quad (5.4)$$

Время всего движения соответственно находят как разность моментов времени начала и конца движения или произведение числа временных интервалов на длительность одного временного интервала:

$$\Delta t_{\text{движ.}} = t_{\text{кон.}} - t_0 = n \frac{1}{f} = \frac{n}{f} \cdot \quad (5.5)$$

Задачи исследования определяют деление движения на фазы. Фазы выделяются либо в целом движении (например, разбег, толчок, полет, приземление), либо для отдельных звеньев (например, при анализе работы каждой ноги и каждой руки).

Для наглядности представления о полученных данных вычерчивают диаграмму фаз движения. По горизонтальной оси (или оси в виде окружности) в удобном масштабе откладывают длительность отдельных фаз в единицах времени. На шкале времени отмечают в виде произвольных по ширине полос (или секторов на круговой диаграмме) фазы движения. Подобные диаграммы принято называть хронограммами (рисунки 5 и 6). Хронограмма в наглядной форме представляет соотношение фаз (т. е. ритм движения), отражает взаимозависимость в работе звеньев и дает материал для анализа координационной структуры движения.

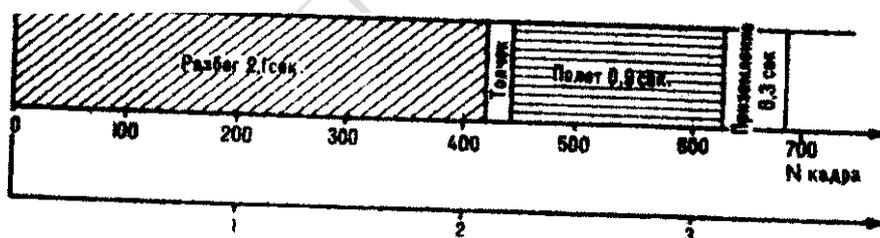


Рисунок 5 – Пример линейной хронограммы движения

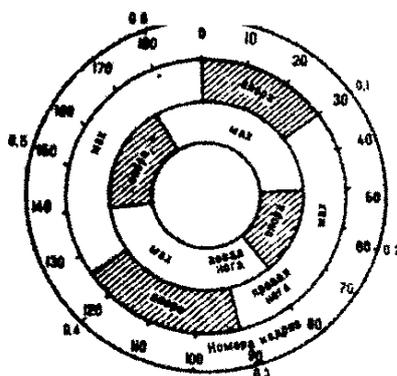


Рисунок 6 – Пример круговой хронограммы движения

Цель работы: определить временные характеристики спортивного движения и соотношение между ними.

Задачи:

- научиться определять периоды и фазы двигательного действия;
- научиться строить линейную хронограмму;

Материалы и оборудование: Для просмотра видеоматериала рекомендуется использовать:

- для индивидуальной работы по предлагаемой методике – ноутбук с программным обеспечением покадрового просмотра видеogramмы;
- для групповой работы дополнительно – мультимедиа и большой экран.

Ход работы

1. Просматриваем предлагаемый для анализа временной структуры движения материал и находим начало отсчета времени, т. е. нулевое положение.

2. Выделяем в движении фазы (согласно педагогическим задачам исследования). Готовим протокол расчета для этих фаз по следующей форме (на примере гребка рукой в кроле на груди $f = 200$ к/с).

Примечание – Если исследуются фазы движения отдельных звеньев (например, правой и левой ноги, правой и левой руки), таблица составляется для каждого звена в отдельности, а просмотр движения начинается с общего нулевого кадра, т. е. начало отсчета времени должно быть единым для всех исследуемых звеньев.

3. Просматривая видеоматериал, определяем начальный кадр движения, обозначив его t_0 .

4. Считая по порядку кадры, записываем в таблицу номера тех кадров, которые соответствуют концам фаз. Начало следующей фазы обозначается кадром окончания предыдущей фазы.

5. Производим расчет времени по формуле:

$$\Delta t_{ср.} = t_{кон.} - t_{нач.} = n \frac{1}{f} . \quad (5.6)$$

6. Подсчитываем доверительный уровень полученных результатов, исходя из того, что погрешность в один кадр к числу кадров в фазе показывает процент ошибки. Например, в фазе 200 кадров. Ошибка в один кадр дает погрешность, равную: $1/200 = 0,005 = 0,5 \%$.

7. По полученным данным строим линейную хронограмму спортивного движения. В верхней части хронограммы проставляем номера кадров, в нижней части – момент времени начала каждого кадра.

8. Для циклических движений определяем частоту повторений в единицу времени – *темп*:

$$N = \frac{1}{\Delta t_{\text{движ.}}} \quad (5.7)$$

9. Находим соотношение времени фаз движения: $\Delta t_1 : \Delta t_2 : \Delta t_3 \dots$

10. Делаем заключение о степени совершенства движения на основе сравнения полученных временных характеристик с таковыми для сильнейших спортсменов. (Эти данные подбираются при самостоятельном изучении научной литературы).

Указания к оформлению отчета

Хронограммы движения вычерчиваются на миллиметровой бумаге в удобном для анализа масштабе. Фазы движения отмечаются цветом или различной штриховкой. В отчете необходимо привести список литературы, по данным которой сделана заключительная оценка результатов работы.

Лабораторная работа 6

Определение угловых скоростей и ускорений продольной оси тела

Теоретические сведения

Программа ориентации – требования к вращению всего тела при выполнении физического упражнения. Знание ее позволяет

определить ориентацию осей тела в любой момент времени. Как и программа места, программа ориентации может быть определена эмпирически и представлена в виде графика «угол – время», уравнения, описывающего данный график, таблиц угловых скоростей и ускорений осей тела.

Способ определения осей тела в биомеханике несколько отличается от принятого в анатомии человека.

Продольной осью (OY) считается прямая, проходящая через центры тяжести верхней и нижней частей тела и, соответственно, через ОЦМ тела.

Перпендикулярно продольной оси тела через ОЦМ тела проходят оси поперечная (OZ) и передне-задняя (OX). Причем ось OX не обязательно должна находиться в плоскости симметрии таза, но она всегда параллельна ей.

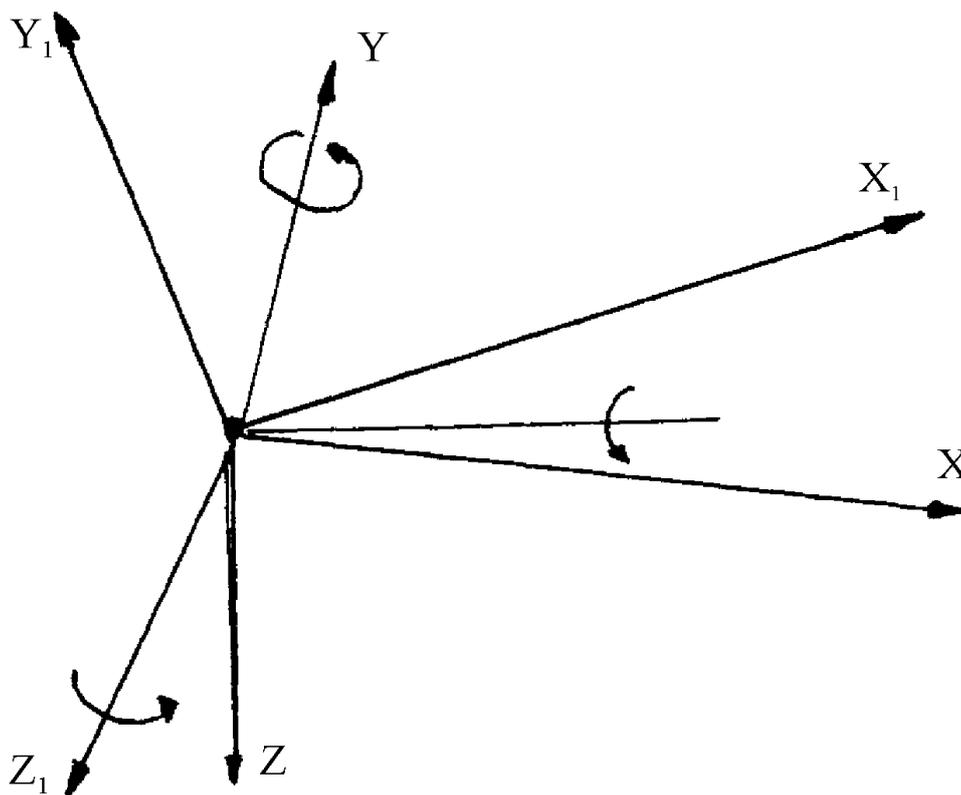
Таким образом, собственные оси тела связаны с ним подвижно, а не жестко. На рисунке оси обозначаются стрелками. Их направление: OY – от ног к голове, OX – от спины к животу, OZ – слева-направо. Ориентацию тела в пространстве характеризуют эйлеровы углы – углы между собственными осями тела и осями неподвижной системы координат. В. Т. Назаров (1984) рекомендует порядок выбора углов, показанный на рисунке 7.

Угол α – мера поворота тела вокруг постоянно ориентированной в пространстве оси OZ , например, при выполнении сальто.

Угол β характеризует величину поворота тела вокруг собственной оси OY , например, при поворотах на месте.

Угол γ характеризует величину поворота вокруг оси OX , например, при выполнении махов на коне. Однако целесообразнее определять его как угол наклона между сагиттальной плоскостью тела (XOY) и горизонтальной плоскостью неподвижной системы координат (X_1OZ_1). Это позволяет сразу судить о конусообразном повороте (циркумдукции) оси OY тела относительно оси OY_1 неподвижной системы координат.

При наблюдении из конца оси угол поворота по часовой стрелке записывается со знаком « \leftarrow », угол поворота против часовой стрелки – со знаком « \rightarrow ».



$OXYZ$ – система осей, связанных с телом (собственные оси тела).

$OX_1Y_1Z_1$ – система осей, неподвижно ориентированных в пространстве. α, β, γ

Рисунок 7 – Выбор эйлеровых углов по В. Т. Назарову (1984)

Угловая скорость тела (ω) показывает, как быстро изменяется ориентация тела в пространстве:

$$\omega = \varphi_2 - \varphi_1 / t_2 - t_1 = \Delta\varphi / \Delta t, \quad (6.1)$$

где φ – угол поворота,

$\Delta\varphi$ – угловое перемещение,

t – момент времени,

Δt – длительность углового перемещения.

Угловое ускорение (ε) характеризует быстроту изменения угловой скорости:

$$\varepsilon = \omega_2 - \omega_1 / t_2 - t_1 = \Delta^*\varphi / \Delta t^2, \quad (6.2)$$

где $\Delta^*\varphi$ – разность угловых перемещений.

Угловые характеристики могут измеряться в градусах и радианах. Но для того чтобы переходить от угловых характеристик к линейным, измерения следует выполнять в радианах. (1 радиан = 57,295781°; 1° = 0,0174533 радиана.)

Аналогично расчету линейных скоростей и ускорений угловые скорости и ускорения можно рассчитать методом разностей:

$$\begin{aligned}\omega &= \Delta\varphi \cdot \gamma / \beta, \\ \varepsilon &= \Delta^* \varphi \cdot \gamma / \beta^2.\end{aligned}\tag{6.3}$$

Угловое перемещение, скорость, ускорение – величины векторные. Абсолютное значение вектора равно величине показателя. Линия направления вектора показывает ось вращения. Стрелка у символа – направление вращения.

Следовательно, вектор угловой характеристики показывает направление процесса не в плоскости рисунка, а перпендикулярно этой плоскости – от наблюдателя или к нему. Этот аспект определяется по правилу буравчика: если острие буравчика совпадает с осью вращения, а направление вращения рукоятки совпадает с направлением вращения линии отсчета, то направление движения острия буравчика совпадает с направлением вектора данного процесса.

При ускоренном вращении тела вектор углового ускорения направлен так же, как вектор угловой скорости. При замедленном вращении – в обратную сторону.

Цель работы: овладеть графоаналитическим способом определения ориентации осей тела человека при выполнении физического упражнения; научиться рассчитывать угловые перемещения, скорости, ускорения.

Материалы и оборудование: таблицы расчета положения ОЦМ тела; видеоматериал с заданной частотой.

Ход работы

1. Вычерчиваем систему прямоугольных координат ХОУ.
2. Отмечаем в системе координат ХОУ положения ОЦМ тела.
3. Рассчитываем и отмечаем в системе координат ХОУ положения центров масс ног (ЦМн).
4. В каждом кадре обозначаем продольные оси тела, соединив попарно ОЦМ тела и ЦМ ног.

5. Из каждого ОЦМ тела опускаем перпендикуляр к оси X .
 6. Заготавливаем бланк таблицы расчета угловых скоростей и ускорений.
 7. Измеряем транспортиром углы наклона продольной оси тела (φ). Данные заносим в графу 2 таблицы 8.
 8. Переводим угловые градусы в радианы. Результаты записываем в графу 3 таблицы 8.
 9. Рассчитываем угловые перемещения ($\Delta\varphi$) и разности угловых перемещений ($\Delta^*\varphi$). Выполняем аналогично расчету линейных перемещений и разности линейных перемещений. Результаты записываем в графы 4 и 5 соответственно.
 10. Рассчитываем угловые скорости и угловое ускорение продольной оси тела. Результаты записываем в графы 6 и 7 таблицы 8 соответственно.
 11. Описываем программу ориентации в исследуемой фазе:
 - указываем величины углов поворота продольной оси тела;
 - указываем величины угловых скоростей и углового ускорения;
 - указываем направление векторов ω и ε ;
 - указываем, ускоряется или замедляется вращение тела.
- Пример результатов работы приведен на рисунке 8.

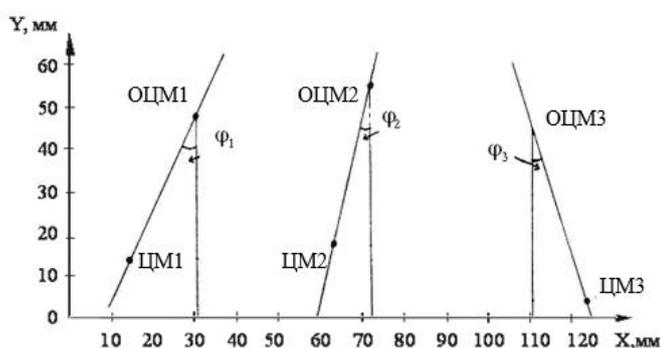


Рисунок 8 – Иллюстрация графического построения при определении программы ориентации тела

- Описываем программу ориентации продольной оси тела в исследуемой фазе физического упражнения:
- величины углов поворота, угловых скоростей и углового ускорения продольной оси тела даны в таблице 8;

- векторы скоростей и ускорения направлены к наблюдателю;
- вращение тела ускоряется.

Таблица 8 – Расчет угловых скоростей и ускорений продольной оси тела

№ кадра	$\varphi, ^\circ$	$\varphi, \text{рад}$	$\Delta\varphi, \text{рад}$	$\Delta^*\varphi, \text{рад}$	$\omega, \text{рад/с}$	$\varepsilon, \text{рад/с}^2$
1	2	3	4	5	6	7
1	-26	-0,4538	0,2095	0,3490	5,03	201,02
2	-14	-0,2443	0,5585	-	13,40	-
3	18	0,3142	-	-	-	-

Лабораторная работа 7

Индексное описание позы тела человека и его движения

Теоретические сведения

Изменение позы тела – это определенное изменение суставных углов. Благодаря таким изменениям человек передвигается целенаправленно. Следовательно, изменения суставных углов выполняют управляющую функцию относительно целостного движения.

Различают *главные и корректирующие управляющие движения*. Первые обязательны при каждом выполнении конкретного упражнения. Без вторых, в принципе, можно обойтись, но они облегчают выполнение упражнения, усиливают его зрительное восприятие и т.д. Выделяют также шумовые движения, которые не влияют на механику двигательного действия, но от которых трудно или невозможно избавиться.

Программа позы – требования к изменению положения частей тела при выполнении двигательного действия. Данная программа, как и программы, рассмотренные выше, может быть установлена эмпирически и представлена в наглядном виде (промер, хронограмма) или математически (матрица суставных углов, скоростей).

Хронограмма (диаграмма фаз двигательного действия) дает материал преимущественно для качественного анализа координационной структуры двигательного действия. Хронограмма удобна тем, что наглядно представляет соотношение фаз двигательного действия (ритм движения), а также показывает наличие групп и рядов движений, то есть движений, выполняемых одновременно и последовательно (таблица 9).

Таблица 9 – Хронограмма шагового движения

Безопорный период 0,292 с		Опорный период 0,125 с		Безопорный период 0,208
1		2		3
Фаза амортизации		0,083 с	0,042 с	Фаза отталкивания
Разведен. 0,083 с	Сведение бедер 0,208 с	Разведение бедер 0,208 с		Сведение 0,125 с

Индексная запись позы и ее изменения неудобна для зрительного восприятия. Однако она дает точное количественное описание процесса и позволяет анализировать его с применением вычислительной техники.

Большинство спортивных движений можно анализировать с использованием 14-звенной модели тела человека. Но индексное описание позы тела человека иногда представляют в виде 21-звенной биокинематической системы (рисунок 9).

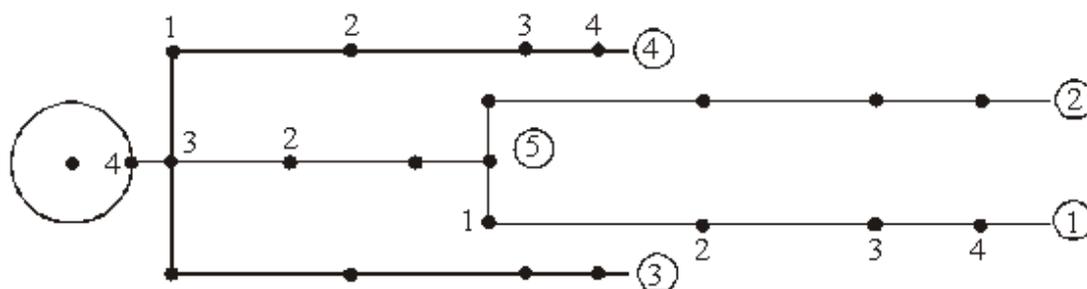


Рисунок 9 – Нумерация биокинематических цепей и сочленений тела человека при индексном описании позы (по В. Т. Назарову, 1984)

Цепи: 1 – правая нога, 2 – левая нога, 3 – правая рука, 4 – левая рука, 5 – позвоночный столб с головой. *Сочленения ног:* 1 – тазобедренный сустав, 2 – коленный сустав, 3 – голеностопный сустав, 4 – плюснефаланговый сустав. *Сочленения рук:* 1 – плечевой сустав, 2 – локтевой сустав, 3 – лучезапястный сустав, 4 – пястно-фаланговый сустав. *Сочленения позвоночника:* 1 – крестцово-поясничное, 2 – пояснично-грудное, 3 – грудно-шейное. 4 – атланта-затылочный сустав.

Пронумерованы и суставные движения. 1 – отведение-приведение (сгибание-разгибание), 2 – ротация (супинация-пронация), 3 – циркумдукция (конусообразное движение).

При индексной записи угла (φ) последовательно указываются: биокинематическая цепь, сустав, тип движения. Например, выражение $\varphi_{321} = 90^\circ$ означает, что правая рука (3) в локтевом суставе (2) согнута (1) на 90° .

Для указания момента времени, в который зафиксирована данная поза, употребляют верхние индексы, например, $\varphi^{0,5}_{321} = 90^\circ$ – сгибание правой руки в локтевом суставе произошло через 0,5 с после начала наблюдения. Однако момент времени ($t = 0$) не обозначают.

Различают индексы фиксирующие (буквы латинского алфавита от a до h), указывающие на то, что речь идет о каком-либо одном из возможных элементов рассматриваемой совокупности; скользящие (от i до s), указывающие на последовательный ряд всех возможных элементов: специальные (от t до z), обозначающие оси, координаты, скорости и т. п. Специальные индексы оговариваются в каждом конкретном случае.

Данный метод может применяться для описания и других объектов, процессов. Например, 3_{41} – четвертой цепи первое звено, то есть левое плечо. V_{32} – скорость правого предплечья.

При этом нужно учитывать следующее:

1) все суставные углы считаются равными нулю в положении основной стойки;

2) порядок измерения углов соответствует нумерации сочленений биокинематических цепей;

3) измеряется не угол между звеньями, а угол поворота собственных осей дистального звена относительно собственных осей проксимального звена. Для плеча и бедра проксимальным звеном является соответствующий отдел позвоночника, либо ось туловища (при использовании 14-звенной схемы тела);

4) движение 1-го типа в боковом направлении уточняется указанием угла конусообразного поворота, и наоборот. Например, $\varphi_{311} = 45^\circ$ ($\varphi_{313} = 90^\circ$) – правая рука вниз – в сторону.

Неискаженные суставные углы при сгибании во фронтальной плоскости видны со стороны груди, а в сагиттальной – справа. В тех случаях, когда движения выполняются во многих суставах, применяется матричное описание позы (рисунок 10).

В общем случае при описании позы тела необходимо пользоваться матрицами углов, образовавшихся в результате движений всех типов. Но если суставные движения какого-либо типа не выполняются, то матрицы таких углов не пишутся.

$$\varphi_{ikl} = \begin{matrix} & \varphi_{11} & \varphi_{12} & \varphi_{13} & \varphi_{14} t \\ & \varphi_{21} & \varphi_{22} & \varphi_{23} & \varphi_{24} \\ \varphi_{ikl} = & \varphi_{31} & \varphi_{32} & \varphi_{33} & \varphi_{34} \\ & \varphi_{41} & \varphi_{42} & \varphi_{43} & \varphi_{44} \\ & \varphi_{51} & \varphi_{52} & \varphi_{53} & \varphi_{54} \end{matrix}$$

Рисунок 10 – Матрица для описания позы тела:
строки – кинематические цепи, столбцы – сочленения цепей

Для записи меняющейся позы используют уравнение простой линейной регрессии типа $Y = a + bX$:

$$\varphi_{авс}^{t_0 \rightarrow tk} = \varphi_{авс} + \omega_{авс}^{t_0 \rightarrow tk} \cdot t, \quad (7.1)$$

где $\varphi_{авс}^{t_0 \rightarrow tk}$ – суставной угол в любой момент времени от начала до окончания движения,

$\varphi_{авс}$ – угол в момент начала наблюдения,

$\omega_{авс}^{t_0 \rightarrow tk}$ – средняя угловая скорость данного движения от начального до конечного момента времени,

t – момент времени, для которого определяется суставной угол.

Вместо скорости одного суставного угла может быть записана матрица угловых скоростей (рисунок 11).

$$\varphi_{ikc}^{t_0 \rightarrow tk} = \varphi_{ikc} + \begin{matrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} & \omega_{14} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \omega_{23} & \omega_{24} \\ \omega_{31} & \omega_{32} & \omega_{33} & \omega_{34} \\ \omega_{41} & \omega_{42} & \omega_{43} & \omega_{44} \\ \omega_{51} & \omega_{52} & \omega_{53} & \omega_{54} \end{matrix}$$

Рисунок 11 – Матрица угловых скоростей $t_0 \rightarrow tk$

Цель работы: ознакомиться со способом математического описания конфигурации системы тел; овладеть способом математического описания изменения конфигурации системы тел.

Материалы и оборудование: промер фазы физического упражнения; матрицы углов поворотов звеньев тела в 3 кадрах; видеоматериал с заданной частотой видеосъемки.

Ход работы

1. На промере продолжаем оси звеньев так, чтобы можно было измерить углы поворота звеньев тела с помощью транспортира. Через центры тазобедренных и плечевых суставов проводим прямые, параллельные оси туловища.

2. Заготавливаем бланки матриц по числу исследуемых изображений.

3. Измеряем углы поворота звеньев тела. Результаты записываем в соответствующие клетки соответствующих матриц.

4. Вычитанием матриц определяем угловые перемещения звеньев тела между кадрами. Результаты записываем в матрицы угловых перемещений.

5. Рассчитываем время между кадрами.

6. Рассчитываем угловые скорости звеньев тела. Результаты записываем в матрицы угловых скоростей.

7. Представляем результаты в виде уравнений регрессии.

8. Описываем программу позы в исследуемой фазе физического упражнения:

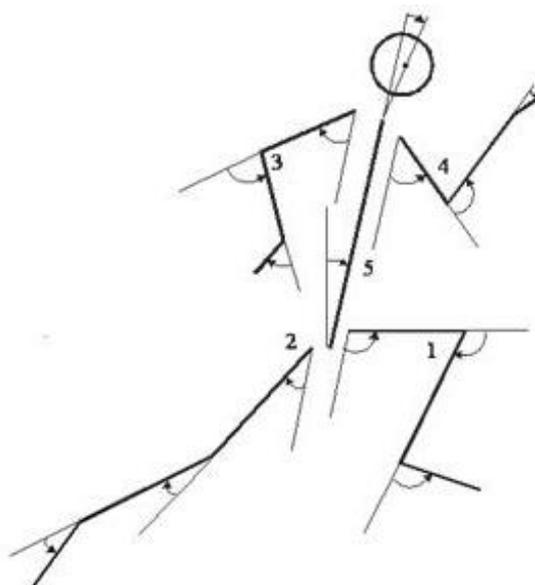
– указываем, в каких суставах выполняются главные управляющие движения;

– указываем, в каких суставах выполняются корректирующие управляющие движения;

– указываем, в каких суставах осуществляются элементы динамической осанки.

Пример результатов работы представлен на рисунке 12.

Примечание – На схеме тела пронумерованы биокинематические цепи и показаны направления поворотов звеньев тела. Прочерк в матрице означает, что угол не измерялся.



	101	-107	103	0,2
	-27	-25	30	—
$\varphi^{0,2}_{ik1}$	-52	77	-059	—
	45	109	-08	—
	1			

Рисунок 12 – Иллюстрация индексного описания позы тела человека

Лабораторная работа 8

Определение управляющей силы в физическом упражнении

Теоретические сведения

Сила – мера взаимодействия физических тел. Величину силы F , приложенной к телу массой m можно определить по ускорению a , полученному телом в результате такого взаимодействия:

$$F = m \cdot a . \quad (8.1)$$

В биомеханике принято деление действующих сил на внутренние и внешние. Однако при определении программы положения тела

действующие силы рассматриваются как естественные (действующие со стороны внешних тел) и управляющие (обусловленные тягой мышц в соответствующих суставах).

Управляющая сила реализует поступательное движение всего тела. Ее величину и направление действия можно определить, сравнив характеристики действительного (управляемого) движения объекта с характеристиками его гипотетического движения под воздействием естественных сил при неизменной (застывшей) позе.

Для количественной оценки естественного (гипотетического) движения объекта необходимо знать меру его инертности, то есть способности сопротивляться изменению характера движения. Для вращательного движения такой мерой является **момент инерции**, для поступательного – масса объекта. По аналогии со вторым законом Ньютона, между **моментом силы** (M), моментом инерции (J) и угловым ускорением (ε) имеется следующая взаимосвязь:

$$M = J \varepsilon . \quad (8.2)$$

Если ось вращения не проходит через центр тяжести объекта или вообще не связана с ним (внешняя ось вращения), то момент инерции твердого тела можно представить как сумму центрального (собственного) момента инерции объекта (J_o) относительно оси, проходящей через его ОЦМ параллельно внешней оси, и произведения массы объекта на квадрат расстояния между этими осями ($R_{ин.}$):

$$J = J_o + m R_{ин.}^2 . \quad (8.3)$$

Если объект является системой тел, то его **центральный момент инерции** (J_{os}) равен сумме полных моментов инерции элементов данной системы:

$$J_{os} = \sum J_{oi} + \sum m_i R_{ин. i}^2 , \quad (8.4)$$

где $R_{ин. i}$ – расстояние между осями вращения, проходящими через ЦТ i -го элемента системы и ОЦМ системы тел.

Для приближенной оценки величины центрального момента инерции звена тела человека это звено можно представить в виде однородного твердого тела и выполнить расчеты по следующим формулам:

– для головы:

$$J_o = m l^2 / 4 ; \quad (8.5)$$

– для остальных звеньев тела:

$$J_o = m l^2 / 12 , \quad (8.6)$$

где m – масса звена тела,

l – длина звена (диаметр головы).

При анализе физических упражнений бывает важно определить управляющие моменты сил, которые реализуют вращательное движение всего тела. Их величины и направление устанавливаются при сравнении характеристик программного и естественного движений. Для этого используется основная формула динамики:

$$M_{вн.} = \Delta L / \Delta t, \quad (8.7)$$

где $M_{вн.}$ – момент внешних сил,

ΔL – изменение кинетического момента тела,

Δt – время, за которое это изменение произошло.

Кинетический момент тела переменной конфигурации, например, тела человека, может быть представлен как векторная сумма ($L_{полн.}$) кинетических моментов звеньев тела – центральных (L_o) и связанных с движением ЦТ звеньев (L) относительно точки отсчета:

$$L_n = \Sigma L + \Sigma L_o = \Sigma m_i V_i d_i + \Sigma \omega J_{oi}, \quad (8.8)$$

где m_i – масса i -го звена,

V_i – модуль линейной скорости ЦТ звена,

d_i – плечо количества движения звена относительно точки отсчета,

J_{oi} – центральный момент инерции звена,

ω_i – угловая скорость звена.

Цель работы: овладеть графоаналитическим способом определения действующих сил.

Материалы и оборудование: промер фазы физического упражнения; величина и направление линейного ускорения ОЦМ

тела; масса тела; центральный момент инерции тела; масштаб изображения.

Ход работы

1. На промере через ОЦМ тела проводим линию действия силы тяжести.

Примечания: 1) если эта линия проходит через площадь опоры, то сумма естественных сил равна нулю;

2) если тело находится в безопорном положении, то естественная сила (сила тяжести) действуют по вертикали ($F_{x\text{ ест.}} = 0$; $F_{y\text{ ест.}} = mg$). В обоих случаях следует переходить к выполнению пункта 10.

2. Проводим прямую от ОЦМ тела к краю площади опоры на промере ($R_{ин.}$).

3. Измеряем радиус инерции. Полученное значение умножаем на величину, обратную масштабу промера, и переводим в метры.

4. Используя формулу (10.3), рассчитываем полный момент инерции тела относительно края площади опоры.

5. Измеряем перпендикуляр от края площади опоры к линии действия силы тяжести – плечо силы тяжести (d). Полученное значение умножаем на величину, обратную масштабу промера, и переводим в метры.

6. Рассчитываем угловое ускорение, приобретаемое ОЦМ тела при естественном движении (под действием силы тяжести):

$$\varepsilon_{\text{ест.}} = mgd / J_{\text{полн.}} \quad (8.9)$$

7. Измеряем угол между направлением действия силы тяжести и радиусом инерции (α).

Примечание – Если нет транспортира, то следует измерить расстояние от ОЦМ тела до поверхности опоры (h). Полученное значение умножить на величину, обратную масштабу промера, и перевести в метры.

8. Рассчитываем горизонтальную и вертикальную составляющие линейного (тангенциального) ускорения, приобретаемого ОЦМ тела при естественном движении:

$$\begin{aligned} a_{x\text{ест.}} &= \varepsilon R_{ин.} \cos\alpha = \varepsilon h, \\ a_{y\text{ест.}} &= \varepsilon R_{ин.} \sin\alpha = \varepsilon d. \end{aligned} \quad (8.10)$$

Примечание – Если ОЦТ тела вращается против часовой стрелки, то $a_{x\text{ ест.}}$ записывается со знаком "+"; a_y всегда записывается со знаком "-".

9. Используя формулу 8.1, рассчитываем горизонтальную и вертикальную составляющие естественной силы ($F_{x\text{ ест.}}$ и $F_{y\text{ ест.}}$).

10. Используя формулу 8.1, рассчитываем горизонтальную и вертикальную составляющие результирующей силы ($F_{x\text{ рез.}}$ и $F_{y\text{ рез.}}$).

11. Рассчитываем горизонтальную и вертикальную составляющие управляющей силы:

$$\begin{aligned} F_{x\text{ упр.}} &= F_{x\text{ рез.}} - F_{x\text{ ест.}} , \\ F_{y\text{ упр.}} &= F_{y\text{ рез.}} - F_{y\text{ ест.}} . \end{aligned} \quad (8.11)$$

12. Строим результирующую управляющей силы ($F_{\text{ упр.}}$).

13. Делаем заключение:

- указываем величину и направление управляющей силы;
- указываем, движения каких звеньев могли внести наибольший вклад в создание управляющей силы.

Пример. Дано: положение ОЦМ тела, точка опоры (край площади опоры) (рисунок 13) ; $a_{x\text{ рез.}} = 10,7 \text{ м/с}^2$, $a_{y\text{ рез.}} = 7,4 \text{ м/с}^2$; $m = 64 \text{ кг}$, $J_{\text{ос}} = 10,8 \text{ кг/м}^2$; М 1:10.

Определить величину и направление $F_{\text{ упр.}}$.

$$R_{\text{ин.}} = 58 \text{ мм} / 1000 = 0,58 \text{ (м)}.$$

$$\text{Аналогично } h = 0,50 \text{ м}, d = 0,30 \text{ (м)}.$$

$$J_{\text{полн.}} = 10,8 + 64 \cdot 0,58^2 = 32,3 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

$$\varepsilon_{\text{ест.}} = 64 \cdot 9,81 \cdot 0,30 : 32,3 = 5,83 \text{ (рад/с}^2\text{)}.$$

$$a_{x\text{ ест.}} = 5,83 \cdot 0,50 = -2,9 \text{ (м/с}^2\text{)}.$$

$$a_{y\text{ ест.}} = 5,83 \cdot (-0,30) = -1,74 \text{ (м/с}^2\text{)}.$$

$$F_{x\text{ рез.}} = 64 \cdot 10,7 = 884,8 \text{ (н)}.$$

$$F_{y\text{ рез.}} = 64 \cdot 7,4 = 473,6 \text{ (н)}.$$

$$F_{x\text{ ест.}} = 64 \cdot (-2,9) = -185,6 \text{ (н)}.$$

$$F_{y\text{ ест.}} = 64 \cdot (-1,74) = -111,4 \text{ (н)}.$$

$$F_{x\text{ упр.}} = 884,8 - (-185,6) = 970,4 \text{ (н)}.$$

$$F_{y\text{ упр.}} = 473,6 - (-111,4) = 585,0 \text{ (н)}.$$

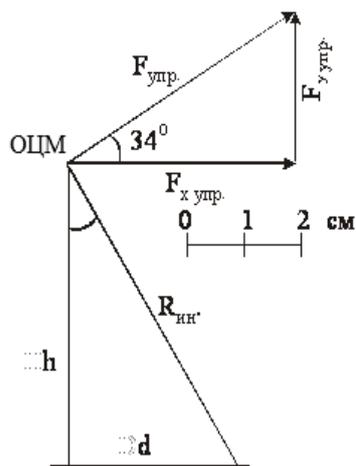


Рисунок 13 – Иллюстрация графоаналитического определения управляющей силы в физическом упражнении

Лабораторная работа 9

Определение кинетического момента (момента количества движения) тела человека

Цель работы: ознакомиться с графоаналитическим способом определения кинетического момента системы тел.

Материалы и оборудование: промер фазы физического упражнения; таблицы расчета положения ОЦМ тела в данной фазе; масштаб изображения; видеоматериалы с заданной частотой.

Ход работы

1. Заготавливаем 2 бланка таблицы расчета кинетического момента тела человека (таблица 10).

Таблица 10 – Расчет кинетического момента тела человека

Звено	m , кг	V , м/с	d , м	J_0 , кг/м ²	ω , рад/с	Лп., нм
1	2	3	4	5	6	7

2. Из таблицы расчета положения ОЦМ тела переносим в графу 2 значения масс звеньев тела.

3. Рассчитываем время между кадрами.

4. Измерением на промере или аналитически определяем перемещения ЦМ звеньев между кадрами (S).

5. Рассчитываем линейные скорости ЦМ звеньев. Результаты записываем в графу 3.

6. Измеряем на промере плечи количества движения звеньев (d) – перпендикуляр от точки опоры к направлению линейного перемещения ЦМ звена. Полученные значения умножаем на величину, обратную масштабу промера, и переводим в метры. Результаты записать в графу 4.

Примечание – Если d отклоняется от вертикали по часовой стрелке, то его величина записывается со знаком " – ".

7. Из таблиц расчета моментов инерции тела (таблица 6) переносим в графу 5 значения моментов инерции звеньев тела.

8. Определяем углы наклона звеньев тела. Рассчитываем угловые скорости звеньев. Результаты записываем в графу 6.

9. Используя формулу 10.8, рассчитываем полные кинетические моменты звеньев тела. Результаты записываем в графу 7.

10. Рассчитываем полный кинетический момент тела человека (сумма чисел графы 7).

Пример. Звено – бедро; $m = 9,0$ кг; $J_0 = 0,13$ кг/м²; $\gamma = 24$ к/с

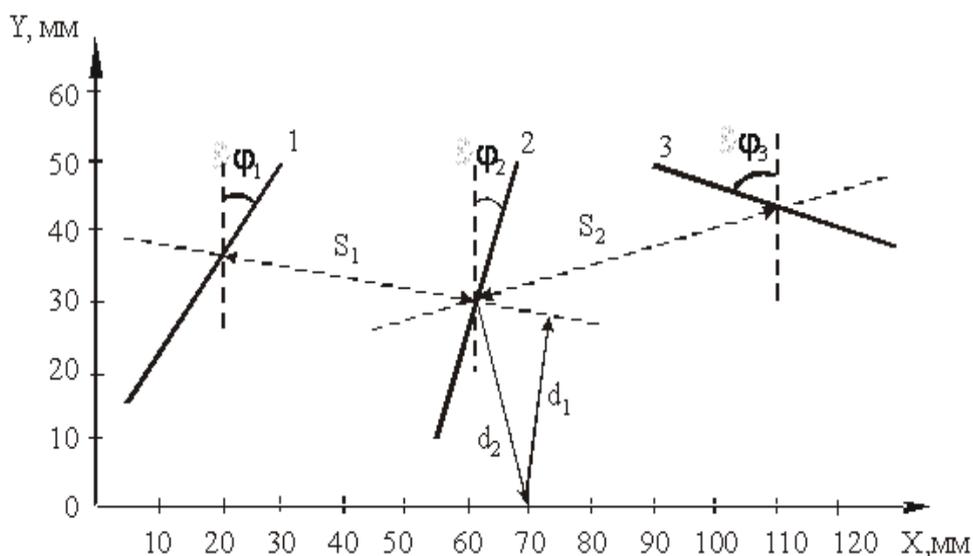


Рисунок 14 – Иллюстрация графоаналитического определения кинетического момента звена тела; М 1:10

Таблица 11 – Расчет кинетического момента бедра

Звено	m , кг	V , м/с	d , м	J_0 , кг/м ²	ω , рад/с	$L_{\text{полн.}}$, нм
1	2	3	4	5	6	7
Бедро	9,0	10,56	-0,29	0,13	7,43	-26,60
Бедро	9,0	11,52	0,30	0,13	39,20	36,20

Расчет линейной скорости ЦМ звена:

- измерением получаем $S_1 = 44 \text{ мм} / 1000 = 0,44 \text{ м}$;
- время между кадрами $1/24 \text{ с}$;
- отсюда $V_1 = 0,44 / 1/24 = 0,44 \cdot 24 = 10,56 \text{ (м/с)}$.

Определение плеча количества движения звена. Измерения и преобразования дали $d_1 = 0,29 \text{ м}$. Так как d_1 отклонилось от вертикали по часовой стрелке, записываем его величину со знаком "-".

Расчет угловых скоростей звеньев дан в лабораторной работе 6.

Лабораторная работа 10

Определение управляющих моментов сил в физическом упражнении

Цель работы: ознакомиться с графоаналитическим способом определения моментов сил, действующих на тело.

Материалы и оборудование: промер фазы физического упражнения; масса тела; масштаб изображения; видеоматериал с заданной частотой; полные кинетические моменты тела в 2 кадрах.

Ход работы

1. На промере в 1 и 2 кадрах через ОЦМ тела проводим линии действия силы тяжести.

2. Измеряем плечи силы тяжести (d) относительно точки опоры (края площади опоры). Полученные значения умножаем на величину, обратную масштабу промера, и переводим в метры.

3. Рассчитываем изменение кинетического момента тела при перемещении от 1-го ко 2-му кадру:

$$\Delta L_{полн.} = L_{полн.2} - L_{полн.1} \quad (10.1)$$

и скорость этого изменения (то есть результирующий момент):

$$M_{рез.} = \Delta L_{полн.} / \Delta t \quad (10.2)$$

4. Рассчитываем управляющий момент:

$$M_{упр.} = M_{рез.} - M_{ест.}, \quad (10.3)$$

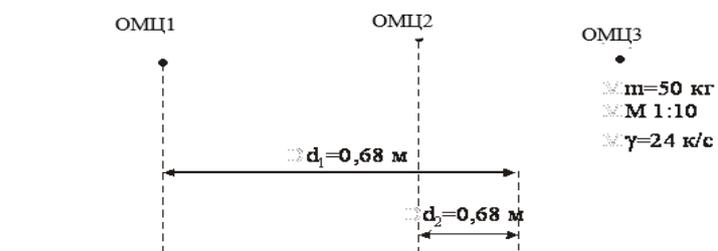
где $M_{ест.}$ – момент силы тяжести = mgd .

Примечание – При взаимодействии тела с опорой в нескольких точках одновременно, кроме момента силы тяжести необходимо учитывать моменты сил реакции опоры:

$$\begin{aligned} R_a &= mgd/l, \\ R_b &= mg - R_a = mg(1 - d/l), \end{aligned} \quad (10.4)$$

где R_a и R_b – реакция опоры в точках a и b ,
 mg – сила тяжести,
 d – плечо реакции опоры в точке b (расстояние от точки b до проекции ОЦТ на площадь опоры),
 l – расстояние между точками a и b .

Пример результатов работы показан на рисунке 15.



Показатели	Кадр 1	Кадр 2	Кадр 3
$L_{полн.}$, НМ	-120	90	110
$\Delta L_{полн.}$, НМ	210	20	—
Δt , с	1/24	1/24	—
$M_{рез.}$, НМ	5040	480	—
d , м	0,68	0,20	—
$M_{ест.}$, НМ	333,5	98,1	—
$M_{упр.}$, НМ	4706,5	981,9	—

Рисунок 15 – Иллюстрация графоаналитического определения управляющего момента

Лабораторная работа 11

Определение полезной механической работы и её средней мощности

Теоретические сведения

Если величина силы, приложенной к твердому телу (которое может быть принято за материальную точку), остается постоянной, то работа (A) этой силы на прямолинейном перемещении рассчитывается по формуле:

$$A = F S \cos\alpha, \quad (11.1)$$

где α – угол между вектором силы и вектором перемещения.

В большинстве случаев при выполнении движений сила не остается постоянной, а само движение может быть криволинейным. В таком случае работа силы рассчитывается по формуле:

$$A = \Sigma F \cos\alpha dS, \quad (11.2)$$

где dS – бесконечно малое перемещение, измеренное вдоль траектории.

Мощность (N) характеризует работу по времени, в течение которого она производилась:

$$N = A/t = FV. \quad (11.3)$$

Работу силы можно также вычислить, воспользовавшись теоремой об изменении энергии тела:

$$\Delta E_k + \Delta E_n = \delta W_1 - \delta W_2, \quad (11.4)$$

где ΔE_k – изменение кинетической энергии тела,
 ΔE_n – изменение потенциальной энергии тела,
 δW_1 – элементарная работа внешних сил, совершенная за счет притекшей энергии,
 δW_2 – потери энергии на преодоление вредных сопротивлений.

При перемещении тела в поле силы тяжести с высоты h_1 на высоту h_2 изменение потенциальной энергии равно:

$$\Delta E_n = mg(h_2 - h_1), \quad (11.5)$$

где m – масса тела,

g – ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$).

Изменение кинетической энергии тела при поступательном движении определяется выражением:

$$\Delta E_{к.(n)} = m(V_2^2 - V_1^2)/2, \quad (11.6)$$

где V_2 и V_1 – конечная и начальная скорость тела.

В случае вращательного движения тела

$$\Delta E_{к.(n)} = (J_{n2} \omega_2^2 - J_{n1} \omega_1^2)/2, \quad (11.7)$$

где J_{n1} и J_{n2} – начальный и конечный полный момент инерции тела,

ω_1 и ω_2 – начальная и конечная угловая скорость тела.

Цель работы: ознакомиться с аналитическим способом определения энергетических характеристик движения.

Материалы и оборудование: масса и полные моменты инерции тела; координаты и линейные скорости ОЦМ тела; угловые скорости продольной оси тела.

Ход работы

1. Используя значения $Y_{оцм.}$, рассчитываем изменение потенциальной энергии тела между 1 и 2 кадрами.

2. Рассчитываем изменение кинетической энергии тела при поступательном движении.

3. Рассчитываем изменение кинетической энергии тела при вращательном движении.

4. Используя выражение 11.4, рассчитываем полезную механическую работу.

5. Используя формулу 11.3, рассчитываем среднюю мощность полезной механической работы.

Литература

1. Сотский, Н. Б. Анализ и синтез физических упражнений: практикум по биомеханике спортивных движений / Н. Б. Сотский, В. Г. Киселев. – Минск : АФВиС, 1992. – 61 с.
2. Годик, М. А. Спортивная метрология : учеб. для ин-тов физ. культ. / М. А. Годик. – М. : Физкультура и спорт, 1998. – 192 с.
3. Зациорский, В. М. Биомеханика двигательного аппарата человека / В. М. Зациорский, А. С. Аруин, В. Н. Селуянов. – М. : Физкультура и спорт, 1981. – 143 с.
4. Каймин, М. А. Расчетно-графические работы по биомеханике и технике спортивных движений в легкой атлетике : метод. разработ. для студ. ин-тов физ. культ. и высш. школы тренеров / М. А. Каймин. – М. : ГЦОЛИФК, 1981. – 33 с.
5. Масальгин, Н. А. Математико-статистические методы в спорте / Н. А. Масальгин. – М. : Физкультура и спорт, 1974. – 151 с.
6. Практикум по биомеханике : пособие для ин-тов физ. культ. / под общ. ред. И. М. Козлова. – М. : Физкультура и спорт, 1980. – 106 с.
7. Селуянов, В. Н. Расчет масс-инерционных характеристик тела спортсменов методом геометрического моделирования / В. Н. Селуянов, Л. Г. Чугунова // Теория и практика физической культуры. – 1989. – № 2. – С. 38–39.
8. Сотский, Н. Б. Биомеханика : учеб. пособие по спец. «Физическая культура и спорт» / Н. Б. Соцкий. – Минск : БГАФК, 2002. – 204 с.
9. Сучилин, Н. Г. Педагогико-биомеханический анализ техники спортивных движений на основе программно-аппаратного видеокомплекса / Н. Г. Сучилин, Л. Я. Аркаев, В. С. Савельев // Теория и практика физической культуры. – 1995. – № 4. – С. 12–21.
10. Назаров, В. Т. Аналитическое представление движений спортсмена / В. Т. Назаров // Вопросы теории и практики физической культуры и спорта. – Вып. 14. – Минск : Выш. школа, 1994. – С. 121–122.
11. Назаров, В. Т. Движения спортсмена / В. Т. Назаров. – Минск : Полымя, 1984. – 176 с.
12. Шацкий, Г. Б. Выбор модели геометрии масс тела для обработки кинограмм / Г. Б. Шацкий, С. С. Рубцов // Итоги НИР–2002 : сб. статей. – Витебск : ВГУ, 2003. – С. 292–294.
13. Shil'ko, S. V. Generalized model of a skeletal muscle / S. V. Shil'ko, D. A. Chernous, and K. K. Bondarenko // Mechanics of composite materials, vol. 51, №6, 2016. – P. 789–800.

Приложение А (обязательное)

Основные правила определения суставных углов при описании позы тела человека с помощью индексного метода

1. Определение углов в суставах конечностей начинать с тазобедренных и плечевых суставов. На позвоночнике – с крестцово-поясничного сочленения.

2. Для отсчета углов со звеном тела жестко связывается система прямоугольных координат $OXYZ$, начало которой совмещается с ЦМ звена, а ось OY параллельна продольной оси звена.

Отсчет углов поворота производится относительно такой же системы координат, связанной с проксимальным звеном. В положении основной стойки все углы считаются равными нулю.

3. Суставные углы, образовавшиеся в результате ротационных суставных движений типа 2, равны углу поворота исследуемого звена вокруг собственной продольной оси OY . Знак угла определяется при наблюдении за движением из проксимального конца звена.

4. Угол, образовавшийся при циркумдукционном движении типа 3, измеряется относительно продольной оси проксимального звена. Нулевому значению этого угла соответствует положение исследуемого звена, отклоненного вперед в плоскости XOY . Направление наблюдения и отсчет углов при циркумдукциях такой же, как и при движениях типа 2.

5. Суставной угол при отводяще-приводящих движениях типа 1 равен углу между продольными осями OY исследуемого и проксимального звеньев. Движения типа 1 могут происходить в различных плоскостях – передне-задней (сагиттальной), фронтальной, промежуточных.

При выполнении движений типа 1 в сагиттальной плоскости исследуемое звено рассматривается из конца оси OZ проксимального звена. При выполнении движения во фронтальной плоскости – из конца оси OX . Величину поворота в промежуточной плоскости описывают дополнительным указанием величины конусообразного поворота исследуемого звена.

Производственно-практическое издание

**Бондаренко Константин Константинович,
Бондаренко Алла Евгеньевна**

БИОМЕХАНИКА

Практическое пособие

Редактор В. И. Шкредова
Корректор В. И. Калугина

Подписано в печать 24.12.2019. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 2,8.
Уч.-изд. л. 3,1. Тираж 25 экз. Заказ 834.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017.
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.
Ул. Советская, 104, 246019, Гомель.

**К. К. Бондаренко,
А. Е. Бондаренко**

БИОМЕХАНИКА

Гомель
2019

