

4. Колос, В.М. Баскетбол: теория и практика : метод. пособие / В.М. Колос. – Минск : Полымя, 1989. – 178 с.

5. Беспалько, В.П. Слагаемые педагогической технологии / В.П. Беспалько. – М. : Педагогика, 1989. – 191 с.

6. Руденко, Н.Г. Образовательные технологии : критерии, признаки, элементы / Н.Г. Руденко // Ценностные приоритеты общего и профессионального образования / Н.Г. Руденко. – М., 2000. – С. 72–73.

7. Маришук, Л.В. Технологизация учебного процесса по физической культуре в вузе / Л.В. Маришук, А.А. Хатеновская (А.А. Быкова) // Ученые записки : сб. рец. науч. тр. / редкол.: М.Е. Кобринский (гл. ред.) [и др.] ; Бел. гос. ун-т физ. культуры. – Минск : БГУФК, 2009. – Вып. 12. – С. 76–89.

**УДК 796.012**

**Ю. В. Воронович**  
*Y. V. Voronovich*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
В ТЯЖЕЛОЙ АТЛЕТИКЕ ПО МАТЕРИАЛАМ  
ВИДЕОСЪЕМКИ**

**DETERMINATION OF BIOMECHANICAL CHARACTERISTICS  
OF WEIGHTLIFTING EXERCISES ACCORDING  
TO THE VIDEOS**

***Аннотация.** В статье изложены основы биомеханического анализа техники соревновательных упражнений в тяжелой атлетике по данным видеосъемки. Описаны этапы выполнения компьютерного промера упражнений. Приведена кинематическая схема шестизвенной модели опорно-двигательного аппарата тела человека, которая может использоваться для количественного биомеханического анализа. Подробно описан аналитический расчет наиболее информативных показателей кинематических и динамических характеристик движения.*

***Summary.** In the article the principles bottoms of biomechanical analysis of techniques of competitive exercises in weightlifting according to the videos are stated. Stages of the computer measurement of exercises are described. The kinematical scheme of 6-linked model of the locomotive apparatus of a man that can be used for a quantitative biomechanical analysis is given. Analytical calculation of the most informative indicators of the kinematic and dynamic characteristics is stated in detail.*

***Ключевые слова:** биомеханический анализ, промер упражнения, математическая модель, кинематические характеристики движений, динамические характеристики движений.*

***Keywords:** biomechanical analysis, measurement of exercises, mathematical model, kinematic characteristics of movements, dynamic characteristics of movements.*

Современный этап развития спорта высших достижений характеризуется высокой напряженностью соревновательной борьбы, связанной с плотностью спортивных достижений участников крупных соревнований, что, в свою очередь, предъявляет повышенные требования к качеству, надежности и стабильности спортивной подготовки. Необходимо отметить, что во всех видах спорта спортсмены достигли очень высокого уровня специальной подготовленности, существенно выросли интенсивность и объем тренировочной нагрузки. На наш взгляд, дальнейшее повышение спортивного результата возможно за счет неиспользованных резервов спортивной техники.

В настоящее время большая часть исследований техники тяжелоатлетических упражнений проводится в условиях тренировки при подъеме штанги меньшего веса, чем спортсмен поднимает на соревнованиях [1]. Вместе с тем по мере уменьшения веса штанги изменяется траектория ее движения, характер усилий и другие биомеханические характеристики упражнения [2; 1]. В результате полученные данные искажают истинные параметры толчка и рывка, имеющие место при подъеме предельных весов на соревнованиях. Именно эти данные представляют наибольший интерес для практики.

На наш взгляд, в сложившейся ситуации единственным инструментом количественного биомеханического анализа техники спортивных упражнений является видеосъемка упражнения с последующей обработкой видеоматериалов на компьютере.

В настоящее время выполнение промера упражнений по материалам видеосъемки не представляет особых затруднений и нашло широкое освещение в специальной литературе [3; 4; 5; 6]. В то же время компьютерная обработка видеоматериалов регистрации движений спортсменов еще не нашла должного освещения в соответствующей научно-методической литературе. Фрагментарные сведения присутствуют, в частности, для обработки результатов съемки аналоговой видеокамерой [7]. Поэтому представляется целесообразным изложить достаточно подробно основные технологические этапы выполнения промера упражнений по материалам цифровой видеосъемки, сделав акцент на использовании в области анализа тяжелоатлетических упражнений.

Сущность выполнения промера по материалам видеосъемки заключается в том, что видеоролик с цифровой видеокамеры заносится в память ПЭВМ. Для определения положения тела спортсмена в пространстве необходимо полученный компьютерный видеофайл представить в виде последовательности отдельных кадров. Затем с помощью специальных программ-редакторов изображений возможен просмотр, модификация, распечатка кадров на бумаге.

Следующий этап компьютерной обработки видеоматериалов – считывание координат тела спортсмена из каждого файла-изображения спортсмена. Для этих целей можно пользоваться любой программой для редактирования графических файлов, например стандартной программой операционной системы Windows – Microsoft Paint. Опишем алгоритм считывания координат:

1. Загрузить файл-изображение кадра в графический редактор.
2. Для вращательных движений обратить внимание на направление движения, т. к. в биомеханических исследованиях за положительное направление движения принимается вращение против хода часовой стрелки.
3. Последовательно подвести курсор к каждой из точек рисунка, координаты которых надо считать (обычно это суставы спортсмена). В редакторе Microsoft Paint эти координаты отображаются в правом нижнем углу экрана. Считываемые координаты удобно сразу заносить в таблицу (мы пользовались программой Microsoft Excel). Отметим, что в этом редакторе точка начала координат размещена в левом верхнем углу экрана, этот факт необходимо учитывать для корректного преобразования декартовых координат суставов в обобщенные координаты звеньев.

Ручное считывание декартовых координат суставов исполнителей неизбежно приводит к погрешностям, поэтому для повышения точности расчетов эмпирические данные необходимо сгладить. В своих исследованиях мы пользовались интерполяционными формулами сглаживания по 5 точкам [8]:

$$\begin{aligned}
 \tilde{y}_0 &= \frac{3y_0 + 2y_1 + y_2 - y_4}{5}, & i=0; \\
 \tilde{y}_1 &= \frac{4y_0 + 3y_1 + 2y_2 + y_3}{10}, & i=1; \\
 \tilde{y}_i &= \frac{y_{i-2} + y_{i-1} + y_{i+1} + y_{i+2}}{5}, & 2 \leq i \leq N-2; \\
 \tilde{y}_{N-1} &= \frac{3y_{N-3} + 2y_{N-2} + 3y_{N-1} + 4y_N}{10}, & i=N-1; \\
 \tilde{y}_N &= \frac{3y_N + 2y_{N-1} + y_{N-2} - y_{N-3}}{5}, & i=N,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $N$  – число элементов данных (кадров),  $\tilde{y}_i$  – сглаженные данные,  $y_i$  – исходные данные.

В формульных выражениях расчетных моделей анализа динамики биомеханических систем в качестве исходных данных используются следующие масс-инерционные характеристики звеньев тела биосистемы: масса звена, длина звена, положение центра масс звена, центральный момент инерции звена.

Для их расчета мы воспользовались методикой, предложенной В.М. Зациорским [9], основанной на использовании уравнений множественной регрессии вида

$$Y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2, \quad (2)$$

где  $Y$  – искомая масс-инерционная характеристика сегмента тела человека,  $B_0, B_1, B_2$  – коэффициенты множественной регрессии,  $X_1$  – масса тела испытуемого,  $X_2$  – рост испытуемого.

В процессе выполнения спортивных упражнений изменяется биохимическое состояние оперативно-двигательного аппарата тела человека. Для количественной оценки этих изменений используют биохимические характеристики движений. Они включают в себя две большие группы биохимических показателей движения: кинематические и динамические.

Расчетные модели анализа движений биомеханических систем позволяют вычислить различные кинематические и динамические характеристики движения.

Для построения расчетных моделей анализа движений биомеханических систем рассмотрим кинематическую схему шестизвенной модели опорно-двигательного аппарата тела человека (рисунок 1), в которой стопа – первое звено, голень – второе звено, бедро – третье звено, туловище с головой – четвертое звено, плечо – пятое звено, предплечье – шестое звено.

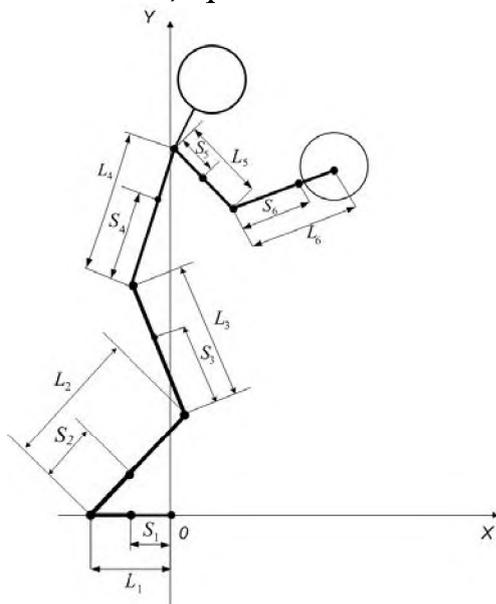


Рисунок 1 – Кинематическая схема шестизвенной модели опорно-двигательного аппарата тела человека

На данную модель наложены следующие ограничения:

1. Звенья тела человека и гриф штанги считаются абсолютно твердыми телами.

2. Суставы, посредством которых звенья тела человека соединяются друг с другом, моделируются цилиндрическими шарнирами, в которых отсутствует трение.

Введем в кинематическую схему модели обозначения:

$L_i$  – длина  $i$ -го звена;

$S_i$  – расстояние от оси вращения  $i$ -го звена до его центра масс;

$Q_i$  – угол наклона  $i$ -го звена к оси  $Ox$  (обобщенные координаты  $i$ -го звена);

$i$  – буквенный индекс, используемый для обозначения номера звена ( $i=1, 2, \dots, N$ );

$N$  – количество звеньев модели.

В кинематическом анализе движений биомеханических систем необходимы сведения и о пространственно-временных характеристиках: угловых скоростях и угловых ускорениях звеньев тела спортсмена. С этой целью введем обозначения для первой и второй производной по времени от обобщенных координат биомеханической системы. Соответственно, для  $N$ -звенной модели биомеханической системы:

$\dot{Q}_i$  – угловая скорость  $i$ -го звена;

$\ddot{Q}_i$  – угловое ускорение  $i$ -го звена.

В связи с тем, что за обобщенные координаты биомеханической системы приняты  $Q_i$ , то  $\dot{Q}_i$  и  $\ddot{Q}_i$ , соответственно, будут обозначать обобщенную скорость и обобщенное ускорение  $i$ -го звена.

Для обозначения масс-инерционных характеристик рассматриваемой шестизвенной модели опорно-двигательного аппарата тела спортсмена введем следующие обозначения:

$P_i$  – вес  $i$ -го звена;

$m_i$  – масса  $i$ -го звена;

$J_i$  – центральный момент инерции  $i$ -го звена.

Наиболее полно методика расчета произвольных биомеханических характеристик изложена в работе В.И. Загrevского «Расчетные модели кинематики и динамики биомеханических систем» [10] (в своих расчетах мы опирались на формулы из этой работы).

Проведенные вычислительные эксперименты позволили установить, что наиболее информативными показателями, характеризующими технику рывка в тяжелой атлетике, являются:

- 1) линейная скорость и ускорение суставов звеньев тела;
- 2) линейная скорость и ускорение центров масс звеньев тела;
- 3) линейная скорость и ускорение общего центра масс биомеханической системы атлет-штанга.

Определение значений скоростей и ускорений возможно расчетным методом, зная координаты и временные параметры движения. Для опреде-

ления координат центра масс звеньев тела спортсмена воспользуемся произвольным выбором расположения начала системы координат и поместим его в точку касания спортсмена с опорой.

Тогда для  $N$ -звенной модели получим:

$$\begin{aligned} X_{c_i} &= S_i \cos Q_i + \sum_{j=1}^{i-1} L_j \cos Q_j, \\ Y_{c_i} &= S_i \sin Q_i + \sum_{j=1}^{i-1} L_j \sin Q_j, \\ i &= 1, 2, 3, \dots, N, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $i$  – номер звена модели,  $X_{c_i}$  – координаты центра масс  $i$ -го звена по оси абсцисс,  $Y_{c_i}$  – координаты центра масс  $i$ -го звена по оси ординат,  $N$  – количество звеньев модели.

Следовательно, координаты суставов определяются следующими формульными выражениями:

$$\begin{aligned} X_{O_i} &= \sum_{j=1}^i L_j \cos Q_j, \\ Y_{O_i} &= \sum_{j=1}^i L_j \sin Q_j, \\ i &= 1, 2, 3, \dots, N, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $X_{O_i}$  – координаты дистального шарнира для  $i$ -го звена по оси  $Ox$ ;  $Y_{O_i}$  – координаты дистального шарнира для  $i$ -го звена по оси  $Oy$ .

Зная координаты центров масс  $i$ -х звеньев  $N$ -звенной модели, можно определить координаты общего центра массы биомеханической системы. Зная, что данные координаты определяются отношением суммы произведений масс звеньев на их координаты к общей массе биомеханической системы и, учитывая формулы (3), получим следующие формульные выражения:

$$\begin{aligned} X_c &= \frac{\sum_{i=1}^N m_i S_i \cos Q_i + \sum_{k=2}^N m_k \sum_{j=1}^{i-1} L_j \cos Q_j}{\sum_{i=1}^N m_i}, \\ Y_c &= \frac{\sum_{i=1}^N m_i S_i \sin Q_i + \sum_{k=2}^N m_k \sum_{j=1}^{i-1} L_j \sin Q_j}{\sum_{i=1}^N m_i}. \end{aligned} \quad (5)$$

Формулы (5) имеют довольно громоздкий вид. Приняв обозначение

$$A_i = \frac{m_i S_i + L_i \sum_{j=i+1}^N m_j}{\sum_{i=1}^N m_i}, \quad (6)$$

формулы (5) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned}
Xc &= \sum_{i=1}^N A_i \cos Q_i, \\
Yc &= \sum_{i=1}^N A_i \sin Q_i.
\end{aligned}
\tag{7}$$

Знание координат центров масс, суставов и общего центра масс биомеханической системы позволит рассчитать такие информативных показатели тяжелоатлетических упражнений, как скорость и ускорение звеньев, суставов и общий центр масс. Для определения скорости и ускорения рассчитанные координаты дифференцируются по времени. Координаты суставов в прямоугольной системе  $Oxy$  определяются через обобщенные координаты, которые изменяются с течением времени, т. е. являются его функцией. Аналитически продифференцировав формулы (4) по времени, получим следующие выражения для определения линейной скорости дистального шарнира  $i$ -го звена:

$$\begin{aligned}
\dot{X}_i &= -\sum_{j=1}^i L_j \dot{Q}_j \sin Q_j, \\
\dot{Y}_i &= \sum_{j=1}^i L_j \dot{Q}_j \cos Q_j.
\end{aligned}
\tag{8}$$

Формулы (8) есть первая производная по времени, определяющая линейную скорость осей шарниров в прямоугольной системе координат. Последующее дифференцирование этого выражения по времени даст вторую производную, т. е. линейное ускорение шарниров.

Тогда для  $N$ -звенной модели формульные выражения линейных ускорений дистального шарнира  $i$ -го звена будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
\ddot{X}_i &= -\sum_{j=1}^i L_j \ddot{Q}_j \sin Q_j - \sum_{j=1}^i L_j \dot{Q}_j^2 \cos Q_j, \\
\ddot{Y}_i &= \sum_{j=1}^i L_j \ddot{Q}_j \cos Q_j - \sum_{j=1}^i L_j \dot{Q}_j^2 \sin Q_j.
\end{aligned}
\tag{9}$$

Чтобы определить линейную скорость и ускорение центров масс звеньев тела, необходимо дважды продифференцировать координаты центра масс звеньев тела (4) по времени. Первая производная будет являться величиной линейной скорости центра масс звена, а вторая – величиной линейного ускорения.

Для  $N$ -звенной модели линейная скорость центра масс для будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
\dot{X}C_i &= -\sum_{j=1}^{i-1} L_j \dot{Q}_j \sin Q_j - S_i \dot{Q}_i \sin Q_i, \\
\dot{Y}C_i &= \sum_{j=1}^{i-1} L_j \dot{Q}_j \cos Q_j + S_i \dot{Q}_i \cos Q_i,
\end{aligned}
\tag{10}$$

$$i = 1, 2, \dots, N.$$

Соответственно, ускорение центра масс  $i$ -го звена имеет вид:

$$\begin{aligned}\ddot{X}C_i &= -\sum_{j=1}^{i-1} L_j (\ddot{Q}_j \sin Q_j + \dot{Q}_j^2 \cos Q_j) - S_i (\ddot{Q}_i \sin Q_i + \dot{Q}_i^2 \cos Q_i), \\ \ddot{Y}C_i &= \sum_{j=1}^{i-1} L_j (\ddot{Q}_j \cos Q_j - \dot{Q}_j^2 \sin Q_j) + S_i (\ddot{Q}_i \cos Q_i - \dot{Q}_i^2 \sin Q_i), \\ i &= 1, 2, \dots, N.\end{aligned}\quad (11)$$

Для того чтобы определить линейную скорость и ускорение общего центра масс биомеханической системы, необходимо продифференцировать по времени уравнения (7). Получим зависимости, определяющие линейную скорость и ускорение перемещения общего центра масс биомеханической системы по горизонтали ( $\dot{X}_c, \ddot{X}_c$ ) и по вертикали ( $\dot{Y}_c, \ddot{Y}_c$ ), для  $N$ -звенной модели:

$$\begin{aligned}\dot{X}_c &= -\sum_{i=1}^N A_i \dot{Q}_i \sin Q_i, \\ \dot{Y}_c &= \sum_{i=1}^N A_i \dot{Q}_i \cos Q_i, \\ \ddot{O}_{\bar{n}} &= -\sum_{i=1}^N A_i \ddot{Q}_i \sin Q_i - \sum_{i=1}^N A_i \dot{Q}_i^2 \cos Q_i, \\ \ddot{Y}_{\bar{n}} &= \sum_{i=1}^N A_i \ddot{Q}_i \cos Q_i - \sum_{i=1}^N A_i \dot{Q}_i^2 \sin Q_i.\end{aligned}\quad (12)$$

Использование оптических методов регистрации движений, в частности видеосъемки результатов соревновательной деятельности тяжелоатлетов, позволяет определять весь спектр информативных показателей техники соревновательных упражнений. Более того, в связи с трудностью использования технических средств срочной информации во время соревнований, оптические методы – практически единственный способ получения количественных характеристик двигательных действий спортсменов.

Вместе с тем использование приведенных аналитических зависимостей для вычисления биомеханических характеристик без средств вычислительной техники является крайне трудоемким процессом, поэтому актуальным является вопрос создания компьютерных программ, вычисляющих информативные показатели техники упражнений по результатам промера. В этом случае оценка техники выполнения упражнения по приведенным в статье формулам у любого конкретного исполнителя не будет представлять для тренера особого труда.

### Библиографический список

1. Корнилова, А.Н. Значение ритмо-временной структуры в технике рывка у женщин-тяжелоатлетов : автореф. дис. ... канд. пед. наук : Рос. гос. ун-т физ. культуры / А.Н. Корнилова. – Малаховка, 2008. – 24 с.

2. Жеков, И.П. Биомеханика тяжелоатлетических упражнений / И.П. Жеков. – М. : ФиС, 1976. – 192 с.
3. Донской, Д.Д. Биомеханика : учеб. пособие для студентов фак. физ. воспитания пед. ин-тов. / Д.Д. Донской. – М. : Просвещение, 1975. – 238 с.
4. Донской, Д.Д. Биомеханика : учебник для ин-тов физ. культуры / Д.Д. Донской, В.М. Зациорский. – М. : ФиС, 1979. – 264 с.
5. Попов, Г.И. Биомеханика : учебник для студ. вузов / Г.И. Попов. – М. : Академия, 2005. – 256 с.
6. Уткин, В.Л. Биомеханика физических упражнений : учеб. пособие для фак-тов физ. воспитания пед. ин-тов / В.Л. Уткин. – М. : Просвещение, 1989. – 210 с.
7. Лавшук, Д.А. Методика организации биомеханических исследований на основе компьютерных технологий обработки видеоматериалов регистрации движений / Д.А. Лавшук // Кулешовские чтения : материалы науч.-практ. конф., Могилев, 6–7 февр. 2001 г. / МГУ им. А.А. Кулешова – Могилев, 2001. – С. 84–86.
8. Дьяконов, В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ : справ. пособие / В.П. Дьяконов. – М. : Наука, 1987. – 240 с.
9. Зациорский, В.М. Биомеханика двигательного аппарата человека / В.М. Зациорский, А.С. Аруин, В.Н. Селуянов. – М. : ФиС, 1981. – 143 с.
10. Загревский, В.И. Расчетные модели кинематики и динамики биомеханических систем. – Томск : Томск. гос. пед. ун-т, 1999. – 156 с.

**УДК 796.012**

**Ю. В. Воронович, Д. А. Лавшук**  
*Y. V. Voronovich, D. A. Lavshuk*

**ВАРИАЦИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
 ШТАНГИ В РЫВКЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МАССЫ  
 СПОРТИВНОГО СНАРЯДА**

**VARIATION KINEMATIC CHARACTERISTICS  
 OF BARBELL IN THE SNATCH DEPENDING  
 ON THE WEIGHT OF IMPLEMENT**

*Аннотация.* В статье изложены подходы к организации количественного биомеханического анализа с использованием обычной цифровой видеокамеры и персонального компьютера. В качестве демонстрации данного подхода проведен анализ изменения кинематических характеристик спортивного снаряда в рывке при изменении массы штанги.

*Summary.* In the article the principles bottoms of quantitative biomechanical analysis with employment of video camera and personal computer are stated. In the capacity of demonstration of these principles is done the analysis of changing of kine-