

3. Захарова, В. В. Развитие скоростно-силовых качеств в учебном процессе студентов 1-го курса : учебное пособие / сост.: В. В. Захарова, И. В. Данилова, А. Ю. Галныкин. – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – 106 с.
4. Покатилов, А. Е. К вопросу оценки скоростно-силовых качеств мышечной системы спортсмена / А. Е. Покатилов, М. А. Киркор, Ю. В. Воронович, Д. А. Лавшук // Биомеханика двигательных действий и биомеханический контроль в спорте: материалы VII Всероссийской с международным участием научно-практической конференции, 21–22 ноября 2019 г., Москва / Рос. гос. акад. физ. культуры, спорта и туризма, Моск. гос. акад. физ. культуры ; ред.-сост. А. Н. Фураев. – М. ; Малаховка, 2019. – С. 108–112.
5. Скоростно-силовые качества [Электронный ресурс] / Спорт-вики – википедия научного бодибилдинга. – 2011. – Режим доступа: <http://sportwiki.to>. – Дата доступа: 05.11.2018.

УДК 51-73; 531.3; 796.01

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ В БИОМЕХАНИКЕ СПОРТА В СФЕРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

А.Е. Покатилов*, С.В. Шкуратов*, Ю.В. Воронович**

** Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий,
Республика Беларусь*

*** Государственное учреждение образования «Средняя школа № 22 г. Могилева»,
Республика Беларусь*

e-mail: pokatilov-a@mail.ru

Аннотация. В работе проанализирована техника рывка штанги, и показано, что движение спортсмена при выполнении упражнения является пространственным. Предложена методика расчета пространственных характеристик движения биомеханической системы с использованием сферической системы координат и показаны проблемы ее применения. При этом исходными данными для биомеханического анализа спортивного упражнения является запись с одной видеокамеры. Предложены модели расчета моментов управляющих сил мышечной системы.

Ключевые слова: биомеханическая система, моделирование, сферические координаты, управляющий момент, штанга.

MOTION MODELING IN SPORTS BIOMECHANICS IN A SPHERICAL COORDINATE SYSTEM

A.E. Pokatilov*, S.V. Shkuratov*, Yu.V. Voronovich**

** Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Republic of Belarus*

*** State educational Institution "Secondary School No. 22 of Mogilev", Republic of Belarus*

Abstract. The paper analyzes the technique of the barbell jerk, and shows that the movement of the athlete during the exercise is spatial. A method for calculating the spatial characteristics of the movement of a biomechanical system using a spherical coordinate system is proposed and the problems of its application are shown. At the same time, the initial data for the biomechanical analysis of a sports exercise is a recording from a single video camera. Models for calculating the moments of the governing forces of the muscular system are proposed.

Keywords: biomechanical system, modeling, spherical coordinates, control moment, barbell.

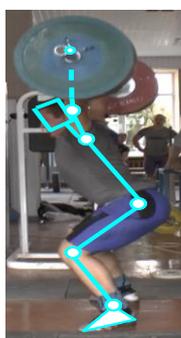
Во многих видах спорта движение спортсмена является пространственным. При этом сложилось несколько вариантов проведения исследования такого движения: при одном разрабатывают сложные методики изучения техники спортивного упражнения, привлекая различные технологии захвата движения, например, технологию компьютерного зрения или маркерные технологии и пр. При другом варианте движением

в одной из плоскостей пренебрегают [1]. Его считают незначительным. Такая ситуация наблюдается, например, при изучении рывка штанги в тяжелой атлетике [2]. Целью этого исследования является изучение возможности и актуальности использования видеосъемки движения спортсмена одной камерой, и получения на этой основе пространственных динамических моделей движения по трем координатным осям.

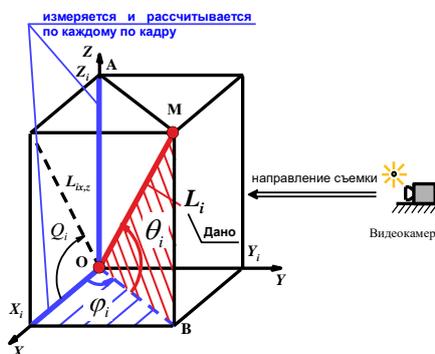
Материал и методы. В качестве исходных материалов предстают результаты видеосъемок выполнения спортивных упражнений в тяжелой атлетике и спортивной гимнастике. Видеоматериалы готовились как по собственным натурным экспериментам, так и на основе учебных фильмов по соответствующим спортивным упражнениям. Методами исследования являлись методы математики, используемые для описания пространственных координат материальных тел, и методы теоретической механики в области динамики твердого тела [3].

Результаты и их обсуждение. На рисунке 1 а) показан кадр видеосъемки рывка штанги в фазе подъема из подседа, выполняемого курсантом института МВД г. Могилева, м/с РБ. Видеосъемка проводилась одной видеокамерой.

На рисунке 1 б) представлена схема i -го звена биомеханической системы (БМС) в прямоугольных декартовых и сферических координатах.



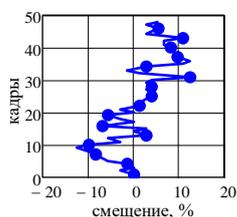
а) кадр видеосъемки



б) пространственные координаты звена

Рисунок 1 – Положения звеньев БМС в пространстве в проекции на сагиттальную плоскость

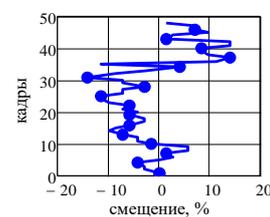
Ранее проведенные нами исследования показали значительное движение конечностей спортсмена во всех трех плоскостях: фронтальной, сагиттальной и горизонтальной [4]. На рисунке 2 б) показана фаза подседа при выполнении рывка. На рисунках 2 а) и в) показаны, рассчитанные нами смещения локтевых суставов в % по отношению к длине соответствующего плеча.



а) – правый локоть;



б) – фаза подседа;



в) – левый локоть

Рисунок 2 – Рывок штанги. Перемещение локтевых суставов

По абсолютной величине смещение каждого локтя оказывается равным примерно 30% с учетом перемещения в обе стороны от первоначального положения сустава в начальной фазе рывка.

Отметим, что после 35 кадра, смещение локтевых суставов происходит преимущественно в одну сторону, влево. Это означает перемещение самой штанги вместе

с локтевыми суставами в горизонтальной плоскости и в одном направлении, без изменения расстояния между локтями.

Таким образом, анализ техники рывка показывает наличие движения звеньев биомеханической системы не только в сагиттальной плоскости, но также во фронтальной, и в горизонтальной плоскостях. Данный факт приводит к значительной ошибке в биомеханическом анализе при видеосъемке движения только в сагиттальной плоскости, без расчета или видео-фиксации движения звеньев во всех остальных направлениях.

Следующей проблемой является необходимость разработки структуры пространственного движения спортсмена [4]. Здесь необходимо учитывать, что при выполнении спортивных упражнений, движение БМС является сложно-координированным.

Важны и критичны следующие два момента методики:

- выбор полюса БМС;
- выбор формы уравнений управляющих моментов в сферической системе координат.

По поводу полюса соображения следующие:

- полюсом необходимо выбирать конец стопы (носок);
- перемещение полюса в абсолютной системе координат учитывается отдельно, так как мышечные усилия осуществляют движение каждого звена БМС относительно сопряженного с другим звеном сустава. Поэтому эти движения необходимо разделить.

По форме динамических уравнений анализ показывает следующее:

- все динамические уравнения должны записываться относительно суставов сопряженных звеньев;
- динамические уравнения записываются относительно движения в сферической системе координат.

Динамические уравнения пространственного движения получаются более сложными, чем в случае плоского движения [5]. В общем случае имеем векторное уравнение для момента управляющих сил мышечной системы в каждом суставе равным

$$\bar{M}_{i,i-1} = \bar{M}_{\theta_i} + \bar{M}_{\varphi_i} + \bar{M}_{\alpha_i}. \quad (1)$$

Здесь моменты \bar{M}_{θ_i} и \bar{M}_{φ_i} соответствуют углам сферической системе координат по рисунку 1 б). Третий момент \bar{M}_{α_i} появляется только в суставах, допускающих ротацию звеньев: пронацию и супинацию.

По модулю величина управляющего момента в пространственном движении из уравнения (1) через проекции моментов равна

$$M_{i,i-1} = \sqrt{\left(M_{\theta_i}^x + M_{\varphi_i}^x + M_{\alpha_i}^x\right)^2 + \left(M_{\theta_i}^y + M_{\varphi_i}^y + M_{\alpha_i}^y\right)^2 + \left(M_{\theta_i}^z + M_{\varphi_i}^z + M_{\alpha_i}^z\right)^2}. \quad (2)$$

Анализ выражения (2) показывает, что проекция момента на ось OZ есть аксиальный управляющий момент мышечной системы, и он равен

$$M_{\varphi_i} = M_{Z_{i,i-1}}. \quad (3)$$

Полярный же управляющий момент проецируется на оси OX и OY

$$M_{\theta_i} = \frac{M_{X_{i,i-1}}}{\sin \varphi_i}. \quad (4)$$

В развернутом виде для любого i -го звена БМС с учетом отсутствия ротации, а значит равенства $I_{L_j}^{(\alpha)} = 0$ и $\ddot{\alpha}_j = 0$, окончательно запишем

$$\begin{aligned}
M_{\theta_i} = & -\frac{\sum_{j=i}^N (I_j^{(\theta)} \ddot{\theta}_j \cos \varphi_j)}{\cos \varphi_i} + \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N [B_{jk} \sin \theta_i (\ddot{\theta}_k \sin \theta_k + \dot{\theta}_k^2 \cos \theta_k)] + \\
& + \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N \left[B_{jk} \frac{\cos \theta_i}{\cos \varphi_i} (\ddot{\theta}_k \cos \theta_k \cos \varphi_k - \dot{\theta}_k^2 \sin \theta_k \cos \varphi_k - \right. \\
& \left. - 2\dot{\theta}_k \dot{\varphi}_k \cos \theta_k \sin \varphi_k - \ddot{\varphi}_k \sin \theta_k \sin \varphi_k - \dot{\varphi}_k^2 \sin \theta_k \cos \varphi_k) \right] + \\
& + g \frac{\sum_{j=i}^N m_j S_j \sin \theta_j \cos \varphi_j}{\cos \varphi_i}. \tag{5}
\end{aligned}$$

Здесь в уравнениях (3)-(5) параметры $I_j^{(\theta)}$ и B_{jk} характеризуют геометрию масс БМС. А углы θ_k , φ_k и их производные $\dot{\theta}_k$, $\dot{\varphi}_k$, $\ddot{\theta}_k$, $\ddot{\varphi}_k$ – это обобщенные координаты и соответствующие им скорости и ускорения.

Тогда имеем управляющий момент относительно оси OZ равным

$$\begin{aligned}
M_{Z_{i,i-1}} = & -\sum_{j=i}^N (I_j^{(\varphi)} \ddot{\varphi}_j + I_{L_j}^{(\alpha)} \ddot{\alpha}_j \cos \theta_j) + \\
& + \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N [B_{jk} \sin \theta_i \sin \varphi_i (\ddot{\theta}_k \cos \theta_k \cos \varphi_k - \dot{\theta}_k^2 \sin \theta_k \cos \varphi_k - \\
& - 2\dot{\theta}_k \dot{\varphi}_k \cos \theta_k \sin \varphi_k - \ddot{\varphi}_k \sin \theta_k \sin \varphi_k - \dot{\varphi}_k^2 \sin \theta_k \cos \varphi_k)] + \\
& + \sum_{k=1}^N \sum_{j=i}^N [B_{jk} \sin \theta_i \cos \varphi_i (\ddot{\theta}_k \cos \theta_k \sin \varphi_k - \dot{\theta}_k^2 \sin \theta_k \sin \varphi_k + \\
& + 2\dot{\theta}_k \dot{\varphi}_k \cos \theta_k \cos \varphi_k + \ddot{\varphi}_k \sin \theta_k \cos \varphi_k - \dot{\varphi}_k^2 \sin \theta_k \sin \varphi_k)]. \tag{6}
\end{aligned}$$

Рассмотрим более общий случай, когда имеется управляющий момент ротации звена вокруг собственной оси (пронация/супинация звена). Имеем

$$M_{\varphi_i} = M_{Z_{i,i-1}} - (M_{X_{i,i-1}} + M_{Y_{i,i-1}}) \operatorname{ctg} \theta_i, \tag{7}$$

$$M_{\alpha_i} = \frac{M_{X_{i,i-1}} + M_{Y_{i,i-1}}}{\sin \theta_i}, \tag{8}$$

$$M_{\theta_i} = \frac{M_{X_{i,i-1}} (\cos \varphi_i - 1) + M_{Y_{i,i-1}} \cos \varphi_i}{\sin \varphi_i}. \tag{9}$$

Выражения (6)-(9) удобнее решать поэтапно, не подставляя все члены в окончательные формулы.

Проанализируем особенности применения сферической системы координат при биомеханическом анализе спортивных упражнений.

На рисунках 3 а)-в) представлена ситуация с изменением угла φ и его неопределенность в некоторых положениях звена ρ .

Рассмотрим ситуацию подробнее. На рисунке 3 а) показано одно из положений звена ρ при угле θ_1 и соответствующий этому положению угол φ_1 . В следующий момент на рисунке 3 б) звено ρ занимает вертикальное положение, и угол φ становится неопределенным, так как он на схеме исчезает, его нет. При этом имеем угол $\theta_2 = \pi/2$. И в третьем положении по рисунку 3 в) звено ρ занимает положение с углом $\theta_2 \neq \pi/2$ и углом φ_3 . При этом угол φ резко, по сути дела скачком, значительно увеличился по значению, перескочив через целый квадрант, и мы получили следующее соотношение $\varphi_1 \ll \varphi_3$.

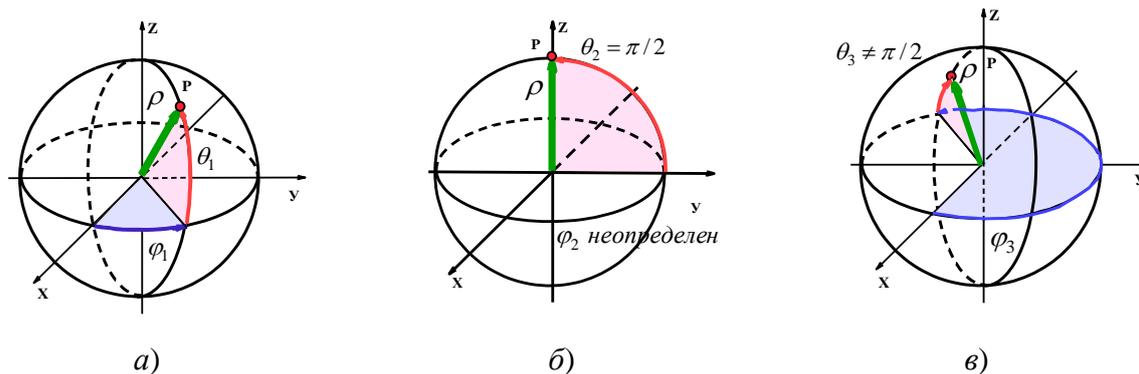


Рисунок 3 – Неопределенность угла φ в сферической системе координат

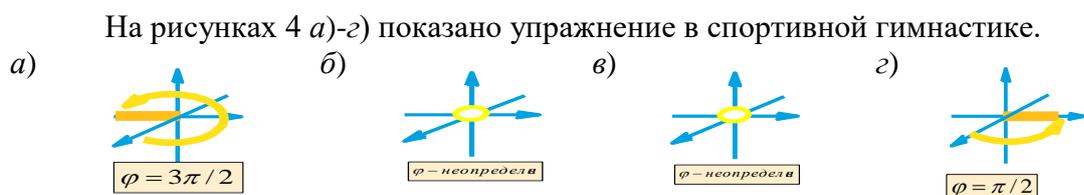


Рисунок 4 – Неопределенность угла φ в сферической системе координат на примере спортивной гимнастики

Такое изменение угла φ на самом деле не отражает реальной кинематики движения, и, во-первых, вносит ошибку в расчеты, а во-вторых, некоторые положения спортсмена во время выполнения упражнений выпадают из вычислений. Рассчитываемые функции, например изменения линейных скоростей суставов и пр., становятся кусочными и прерывистыми, но на самом деле спортсмен при этом движется плавно.

В качестве примера на рисунках 4 а)-г) показано выполнение спортивного упражнения на перекладине и ситуация, когда тело спортсмена занимает вертикальное положение и угол φ становится неопределенным. Но это никак не сказывается на плавности и непрерывности движения БМС по кадрам рисунков 4 а)-г).

Тем не менее, сферическая система координат широко применяется в различных областях человеческой деятельности, например, в астрономии и географии. Есть перспективы использования данной системы и в биомеханике. Но данный вопрос требует дополнительного изучения и применение специальных вычислительных алгоритмов, учитывающих и нивелирующих особенность сферической системы координат, рассмотренную в данном параграфе.

Заключение. Анализ видеоматериалов, полученных при выполнении спортивных упражнений, снятых с помощью одной видеокамеры, показывает возможность расчета пространственных параметров движения спортсмена на динамическом уровне. При этом исследование рывка штанги в тяжелой атлетике, показывает, что многие движения в спорте, которые изучают как плоские, на самом деле являются пространственными. При этом очень важен выбор координатной системы для разработки меха-

нико-математических моделей. Так выявлено, что модели в сферической системе координат при исследовании движения спортсмена в пространстве имеют неопределенность координат в некоторых траекторных положениях биомеханической системы, что требует дальнейшего исследования и разработки методов и способов преодоления данной особенности сферической координатной системы.

Литература

1. Бегун, П. И. Моделирование в биомеханике: учеб. пособие / П. И. Бегун, П. Н. Афонин. – М. : Высш. шк., 2004. – 390 с.
2. Воронович, Ю. В. Сравнительный анализ выходной мощности, развиваемой тяжелоатлетами различной спортивной квалификации в упражнении "рывок" / Ю.В. Воронович, Д. А. Лавшук, А. Е. Покатилов, Р. В. Левков // Веснік МДУ. – 2022. – № 2 (60). – С. 63-70.
3. Воронович, Ю. В. Биомеханический анализ пространственного движения на кинематическом уровне / Ю. В. Воронович, А.Е. Покатилов, Ю. В. Лисейчикова, Д. А. Лавшук // Актуальные проблемы огневой, тактико-специальной и профессионально-прикладной физической подготовки [Электронный ресурс] : сборник статей Могилев. институт МВД. – 2022. – С. 320-327.
4. Моделирование пространственного движения биомеханических систем в сферической системе координат / А. Е. Покатилов, Т. Д. Симанкова // Научные и методические аспекты математической подготовки в университетах технического профиля: материалы Междунар. науч. пр. конф., ноябрь 2020 г., Гомель / Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта»; – Гомель : БелГУТ, 2020. – С. 106-109.
5. Покатилов, А. Е. Биодинамические исследования спортивных упражнений в условиях упругой опоры : монография / А. Е. Покатилов, В. И. Загревский, Д. А. Лавшук. – Минск : Издательский центр БГУ, 2008. – 291 с.

УДК 796: 071.434/799

ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ДЕСЯТИБОРЬЯ

И.В. Романов

Витебский государственный медицинский университет, Республика Беларусь

e-mail: thlonilya1980@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается история развития десятиборья. В статье сделан анализ развития десятиборья в разные временные периоды, представлены хронологические изменения в таблице подсчетов очков. Также автором были обозначены основные современные тенденции развития.

Ключевые слова: десятиборье, многоборец, история и тенденции развития.

HISTORY AND MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF DECATHLON

I.V. Romanov

Vitebsk State Order of Peoples' Friendship Medical University, Republic of Belarus

Abstract. In the article the history of the development of decathlon. The article analyzes the development of decathlon in different time periods and presents chronological changes in the scoring table. The author also outlined the main trends of modern development.

Keywords: decathlon, sports training, history and trends in the development.

Десятиборье – классическое легкоатлетическое многоборье для мужчин, включающее десять видов легкой атлетики, – занимает значительное место в современном международном спортивном мире.

Соревнования по десятиборью проводятся в два дня: 1-й день – бег на 100 м, прыжки в длину, толкание ядра, прыжки в высоту, бег на 400 м; 2-й день – бег на 110 м,