

## СЕКЦИЯ 4

# БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПОДГОТОВКЕ СПОРТСМЕНОВ ВЫСШЕЙ КВАЛИФИКАЦИИ И СПОРТИВНОГО РЕЗЕРВА

УДК 796.012

## МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОЩНОСТЕЙ

<sup>1</sup>Ю. В. Воронович, <sup>2</sup>А. Е. Покатилов, <sup>2</sup>С. В. Шкуратов

(<sup>1</sup>ГУО «Средняя школа № 22 г. Могилева», Могилев, Беларусь,

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Могилев, Беларусь)

В работе проанализирован энергетический баланс кинематических цепей применительно к задачам биомеханики спорта. Показано существование двух типов мощности: механической и биомеханической. Механическая мощность рассчитывается, исходя из общих законов теоретической механики. Биомеханическая мощность развивается мышечной системой спортсмена во время целенаправленного движения и ее механико-математические модели отличаются от подобных моделей механической мощности. Предложенные модели мощности разрабатывались на примере рывка штанги в тяжелой атлетике.

*Ключевые слова:* биомеханическая мощность, биомеханическая система, механическая мощность, модели, тяжелая атлетика.

В биомеханическом анализе спортивных упражнений на динамическом уровне некоторые вопросы не получили должного внимания и по этой причине не разработаны. При этом важность и актуальность их несомненна [1]. Например, это касается мощности, развиваемой спортсменом во время упражнения, и очевидно, явным образом сказывающейся на технике выполнения целенаправленных движений [2].

Существующие подходы в разделах механики, занимающихся изучением энергетических характеристик движения кинематических цепей, подобных опорно-двигательному аппарату человека, относятся к неодушевленным объектам, а именно к механизмам [3]. Биологическую природу, то есть наличие мышечной системы такие исследования совершенно не учитывают.

Цель исследования – показать различие механической и биомеханической мощностей и предложить механико-математические модели механической и биомеханической мощностей для биомеханической системы (БМС) со многими степенями свободы.

В механике для кинематических цепей, подобных опорно-двигательному аппарату человека, разработана методика оценки энергетического баланса [3, 4]. В общем виде выражение баланса запишем как

$$N_{\dot{\alpha}_{i-1,i}}^o - N_{\dot{\alpha}_{i-1,i}}^{n.c} - N_{\dot{\alpha}_{i-1,i}}^m \pm N_{\dot{\alpha}_{i-1,i}}^u \pm N_{\dot{\alpha}_{i-1,i}}^{c.m} = 0, \quad (1)$$

где  $N_{\dot{\alpha}_{i-1,i}}^o$  – мощность, развиваемая движущими силами;  
 $N_{\dot{\alpha}_{i-1,i}}^{n.c}$  – мощность, затрачиваемая на преодоление полезных сопротивлений;  
 $N_{\dot{\alpha}_{i-1,i}}^m$  – мощность, затрачиваемая на преодоление всех сил трения и других сопротивлений, относящихся к вредным;  
 $N_{\dot{\alpha}_{i-1,i}}^u$  – мощность, затрачиваемая на изменение кинетической энергии рассматриваемой части БМС или, наоборот (в зависимости от знака), получаемая за счет изменения кинетической энергии рассматриваемой части БМС;  
 $N_{\dot{\alpha}_{i-1,i}}^{c.m}$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сил тяжести или, наоборот (в зависимости от знака), развиваемая силами тяжести.

Формула энергетического баланса (1) применяется при конструировании и исследовании механизмов и машин [3]. Данное выражение справедливо и в случае биомеханических исследований движения спортсмена. Различие появляется лишь в расчетах конкретных мощностей, входящих в выражение (1).

Отметим, что особенность анатомии человека такова, что во время движения одна из костей в сопряженном суставе неподвижна, вторая же приводится к первой. Таким образом, констатируем, что динамика движения биомеханической системы в корне отличается от динамики движения любого механизма, хотя обе системы представляют собой кинематические цепи [3, 5]. Движения сопряженных костей БМС осуществляются в относительном движении друг относительно друга, а значит, мощность должна рассчитываться не по угловой скоро-



Рис. 1. Рывок

сти, а по суставной скорости, то есть по разности угловых скоростей сопряженных звеньев.

На рисунке 1 показан рывок штанги в тяжелой атлетике, и обозначено, что голень разгибается относительно стопы с угловой скоростью (она же суставная), а бедро разгибается относительно уже самой голени с суставной скоростью  $\Delta\dot{Q}_{i,i-1}$ . Поэтому нами было введено понятие биомеханической мощности, то есть именно той мощности, которую развивает мышечная система в целенаправленном движении БМС при вращении звеньев в суставах.

Таким образом, биомеханическую мощность можно представить в виде уравнения

$$N_{БМС} = Fv_p + \sum_{i=1}^N M_{i,i-1} \Delta\dot{Q}_{i,i-1}, \quad (2)$$

где  $v_p$  – скорость полюса;

$\alpha_s$  – сила, приложенная к полюсу БМС;

$\Delta\dot{Q}_i$  – суставная угловая скорость между звеньями  $i-1$  и  $i$ .

В уравнении (2) учтено, что движение БМС в общем случае состоит из перемещения полюса (точка Р) и вращательных движений звеньев в соответствующих  $i$ -х суставах [4].

Таким образом, на основании анализа методов механики, используемых для расчета энергетических показателей движения, констатируем, что для биомеханической системы как обычного тела в пространстве подходят методы расчета механической мощности. Но целенаправленное

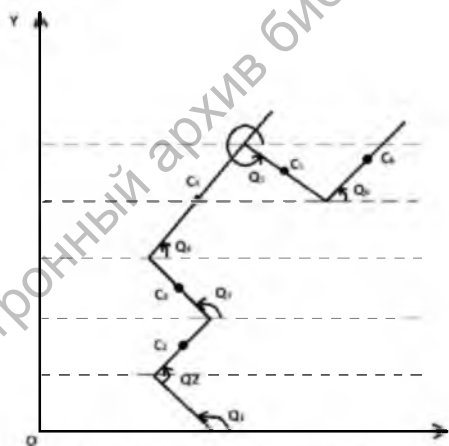


Рис. 2. Расчетная схема в тяжелой атлетике

движение спортсмена осуществляется за счет работы мышечной системы, которая развивает определенную мощность при данном типе движения человека. И это уже биомеханическая мощность, развиваемая при выполнении спортивного упражнения человеческим телом. Другими словами, есть необходимость развития методов биомеханического анализа в этих двух направлениях.

На рисунке 2 показана кинематическая схема, применяемая в биомеханическом анализе при расчете рывка штанги в тяжелой атлетике. Здесь биомеханическая система представлена в виде шестишвенника [2].

На основании рисунка 2 составим уравнения механической мощности для отдельного звена. Формула имеет рекуррентный вид и не зависит от степени свободы, принятой к изучению кинематической модели БМС [5, 6].

Имеем механическую мощность для звена равную

$$N_{i,i-1}^M = g \sum_{j=1}^N C_{ij} \cos Q_j \cdot \dot{Q}_i + \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N A_{jk} \ddot{Q}_k \cos(Q_k - Q_j) \cdot \dot{Q}_i - \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N A_{jk} \dot{Q}_k^2 \sin(Q_k - Q_j) \cdot \dot{Q}_i. \quad (3)$$

А для всей БМС получим

$$N^M = \sum_{i=1}^n N_{i,i-1}^M = \sum_{i=1}^n \left[ g \sum_{j=1}^N C_{ij} \cos Q_j \cdot \dot{Q}_i + \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N A_{jk} \ddot{Q}_k \cos(Q_k - Q_j) \cdot \dot{Q}_i - \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N A_{jk} \dot{Q}_k^2 \sin(Q_k - Q_j) \cdot \dot{Q}_i \right]. \quad (4)$$

Формулы (3) и (4) учитывают только движение спортсмена. Здесь коэффициенты  $C_{ij}$  и  $A_{jk}$  отражают геометрию тела, а  $Q_j$  – обобщенные координаты и  $\dot{Q}$ ,  $\ddot{Q}_k$  – обобщенные скорости и ускорения.

Используя соображения, высказанные ранее и с учетом выражения (2), запишем для биомеханической мощности  $i$ -го звена БМС уравнение

$$N_{i,i-1}^E = g \sum_{j=1}^N C_{ij} \cos Q_j \cdot \Delta \dot{Q}_i + \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N A_{jk} \ddot{Q}_k \cos(Q_k - Q_j) \cdot \Delta \dot{Q}_i - \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N A_{jk} \dot{Q}_k^2 \sin(Q_k - Q_j) \cdot \Delta \dot{Q}_i. \quad (5)$$

Тогда на основе выражения (5) запишем для всей БМС биомеханическую мощность в виде

$$N^E = \sum_{i=1}^n \left[ g \sum_{j=1}^N C_{ij} \cos Q_j \cdot \Delta \dot{Q}_i + \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N A_{jk} \ddot{Q}_k \cos(Q_k - Q_j) \cdot \Delta \dot{Q}_i - \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N A_{jk} \dot{Q}_k^2 \sin(Q_k - Q_j) \cdot \Delta \dot{Q}_i \right]. \quad (6)$$

В последнем выражении представлена мощность, развиваемая всей мышечной системой независимо от направления движения каждого звена, то есть знака выполняемой при движении работы.

## Список использованной литературы

1. Покатилов, А. Е. Исследование динамических характеристик мышечной системы спортсмена / А. Е. Покатилов // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 1 (50). – С. 101–110.
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. Левитский, Н. И. Теория механизмов и машин / Н. И. Левитский. – М. : Высшая школа, 1990. – 592 с.
4. Поляхов, Н. Н. Теоретическая механика : учебник для бакалавров / Н. Н. Поляхов, С. А. Зегжда, М. П. Юшков; под ред. П. Е. Товстика. – М. : Юрайт, 2012. – 593 с.
5. Покатилов, А. Е. Проблемы исследования механики движения опорно-двигательного аппарата человека / А. Е. Покатилов, М. А. Киркор // Проблемы физики, математики и техники. – 2017. – № 1 (30). – С. 59–67.
6. Моделирование сложно-координированного целенаправленного движения спортсмена: проблемы и пути решения / М. А. Киркор [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2020. – № 4 (45). – С. 68–75.