

УДК 612.76+796.022+611.7

Сотский Н.Б.

О ЧИСЛОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЯХ БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РАЗВИТИЯ ФИЗИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ СПОРТСМЕНА

В статье анализируется влияние конструктивных и методических параметров технических средств развития двигательных качеств на показатели, определяющие биомеханическую эффективность этих устройств. Рассмотрена зависимость коэффициентов пространственной размерности, инерционности и рассеивания энергии от характера используемых в конструкции тренажерных устройств сил механического характера: гравитационных, упругих и диссипативных. Показана перспектива применения устройств со многими степенями свободы, использующими для воздействия на тренирующегося сил диссипативного характера.

Ключевые слова: тренажер, пространственная размерность, инерционность, рассеивание энергии, биомеханическая эффективность.

Постановка проблемы. Настоящая работа посвящена оценке биомеханической эффективности тренажерных и тренировочных устройств на основе анализа особенностей использования в них механических сил различного характера. Решение исследуемой проблемы представляет интерес в отношении возможности объективного определения показателей биомеханической эффективности существующих технических средств развития физических качеств спортсмена и оценки возможности дальнейшего развития тренажерных технологий на основе оптимизации предложенных характеристик.

Анализ последних исследований и публикаций. Эта работа является продолжением исследования [1], в котором была предложена классификация технических средств физической культуры, построенная основе использования информации о внутренней (по В.Т. Назарову [2]) биомеханической структуре физических упражнений. Она представляет собой объединение в рамках достижения цели двигательного действия трех блоков – психо-информационного, физиологического и механического.

Для упражнений, связанных с развитием основных физических качеств силы, выносливости и гибкости, в соответствии с предложенной классификацией, целевым или конечным блоком (уровнем) реализации физического упражнения является физиологический, входным – механический и средствами воздействия – механические силы. Особенности использования последних в ходе развития двигательных качеств в целом известны [3], они применяются в значительном количестве технических устройств, однако вопросы особенностей их взаимодействия с тренирующимся выяснены не до конца. В частности, практически не рассмотрены вопросы численной оценки взаимного кинематического соответствия тренировочных и соревновательных движений пространственного характера, отсутствуют методики учета и дозирования инерционных силовых добавок, возникающих при ускоренных перемещениях отягощений и частей технического устройства. Важным вопросом эффективности тренажера представляется и проблема рассеивания энергии, циркулирующей в ходе выполнения физического упражнения.

В упомянутой работе были предложены численные показатели оценок кинематических пространственных возможностей технического устройства – коэффициент пространственной размерности (K_{dim}), влияния инерционных воздействий – коэффициент инерционности (K_{in}) и коэффициент рассеивания энергии (K_{dis}), которые рекомендовалось рассматривать как биомеханические параметры эффективности тренажерного устройства. Указанные характеристики были введены без анализа тенденций их изменений в результате варьирования определяющих их параметров (массы отягощения, темпа выполнения упражнения, амплитуды перемещения звеньев тела и др.).

Цель работы. Оценить влияние природы силового воздействия, а также биомеханических параметров упражнения, выполняемого с использованием технического средства на величины коэффициентов биомеханической эффективности технического устройства, используемого для развития физических качеств спортсмена.

Метод исследования – качественный теоретический анализ тренажерных упражнений на основе методов классической биомеханики.

Основной материал исследования. Наиболее распространенной системой обеспечения тренировочной нагрузки является использование гравитационных сил. Основной особенностью здесь является необходимость вертикального перемещения массивного отягощения. В соответствии с этим конструкции тренажерных устройств предполагают наличие грузов и направляющих для их

перемещения. Усилие передается на звенья тела человека через систему рычагов и блоков [4]. На рабочем элементе устройства, взаимодействующим со звеном тела человека может быть обеспечено тренировочным сопротивлением движение, соответствующее одной линейной или одной вращательной степени свободы [4,6]. Это же можно утверждать и в отношении контактирующего с тренажером звена тела. В результате коэффициент пространственной размерности K_{dim} , для таких систем составляет 0,17. Аналогичные показатели имеют устройства, использующие силы упругости.

При использовании фрикционных сил и сил вязкого сопротивления традиционные технические устройства, как правило, аналогично рассмотренному случаю, конструктивно обеспечивают сопротивление пространственно-линейного или вращательного характера, при котором нагрузка приходится на одну степень свободы контактирующего с рабочим элементом тренажера звена тела человека. В таком случае коэффициент пространственной размерности также как и в описанном выше случае имеет значение 0,17.

Следует отметить, что ситуация изменилась в последнее время с появлением фрикционных тренажеров со многими степенями свободы [6], при использовании которых движение звена тела человека, находящегося в контакте с рабочим органом устройства может получить тренировочное усилие одновременно для шести степеней свободы. Для такого устройства коэффициент K_{dim} имеет максимальное значение равное единице.

Максимальное значение рассматриваемого коэффициента может быть достигнуто также при использовании свободных весов, однако, в соответствии с традиционными классификациями технических средств физической культуры [5], они не рассматриваются в качестве технических средств или тренажеров.

Таким образом, при традиционном использовании сил механического характера в конструкции технических устройств для развития физических качеств коэффициент пространственной размерности имеет значение от 0,17. В то же время в этом отношении представляется перспективным использование фрикционных тренажеров со многими степенями свободы [6], что позволяет поднять его значение до максимума, равного единице.

Коэффициент инерционности вводится как разность единицы и отношения максимальной достигаемой в ходе упражнения кинетической энергии (E_{kin}) перемещаемых при выполнении упражнения масс к сумме указанной кинетической энергии и работ консервативных (A_k) и диссипативных (A_{dis}) сил:

$$K_{in} = 1 - \frac{E_{kin}}{E_{kin} + A_k + A_{dis}} \quad (1)$$

В случае тренажера, использующего гравитационные силы, как правило, трение в шарнирах его конструкции и сопротивление воздуха имеют пренебрежимо малые значения по сравнению силой тяжести перемещаемой массы. Поэтому если в ходе качественного анализа учитывать только перемещение отягощения, то работа A_k консервативных сил земного притяжения определяется произведением mgh , где m – суммарная масса отягощения и перемещаемых вертикально частей устройства, g – ускорение свободного падения и h – вертикальное перемещение отягощения. Кинетическая энергия перемещаемого груза определяется классической формулой как $E_{kin} = mV^2 / 2$, где V – максимальная скорость отягощения. После подстановки полученных выражений в формулу (1) и несложных преобразований значение коэффициента инерционности приобретает вид:

$$K_{in} = 1 - \frac{V^2}{V^2 + 2gh} \quad (2)$$

Если подставить оценочное значение скорости, полученной в предположении равномерности перемещения отягощения как $V = h/t$, где t – время выполнения движения, то выражение коэффициента инерционности приобретет вид:

$$K_{in} = 1 - \frac{\left(\frac{h}{t}\right)^2}{\left(\frac{h}{t}\right)^2 + 2gh} = \frac{2g}{\frac{h}{t^2} + 2g} = \frac{1}{1 + \frac{h}{2gt^2}} \quad (3)$$

Анализ последнего выражения показывает, что коэффициент инерционности устройства, использующего для обеспечения тренировочного сопротивления гравитационные силы, зависит от вертикального перемещения отягощения и времени этого перемещения. При этом отсутствует зависимость от массы груза. При постоянном значении времени выполнения упражнения увеличение величины перемещения снижает значение коэффициента инерционности, что соответствует увеличению скорости движения груза и более существенному влиянию инерционных сил при выполнении упражнения. К такому же результату приводит снижение времени выполнения упражнения (увеличение его темпа), причем изменение времени влияет сильнее, поскольку здесь имеет место квадратичная зависимость.

Таким образом, при использовании в техническом устройстве гравитационных сил масса перемещаемого отягощения не оказывает влияния на коэффициент инерционности, а его увеличение, соответствующее улучшению инерционной характеристики устройства, происходит в результате снижения скорости перемещения отягощения, что соответствует уменьшению темпа выполнения

упражнения, являясь методическим параметром. В качестве конструктивной характеристики устройства здесь фигурирует задаваемая его конструкцией амплитуда выполняемого упражнения величина, которая имеет положительное влияние на коэффициент инерционности.

При использовании в техническом устройстве упругих сил работа деформации упругого элемента определяется как $kx^2/2$, где k – показатель его упругости, а x – величина деформации. Если движение, как и в предыдущем случае, предположить равномерным, скорость можно определить как x/t и после подстановки в формулу (1) значения кинетической энергии и несложных преобразований значение коэффициента инерционности приобретает вид:

$$K_{in} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{kt^2}{m}} \quad (4)$$

Анализ полученного выражения показывает, что величина коэффициента инерционности в случае устройства использующего силу упругости положительно зависит от времени выполнения упражнения, и отрицательно от перемещаемой массы (суммарно конструкции тренажера и звеньев тела тренирующегося) и коэффициента упругости. При этом положительная зависимость от времени имеет квадратичный характер и является более сильной, чем от остальных параметров.

Таким образом, при применении устройства использующего силы упругости улучшение показателя инерционности может быть достигнуто увеличением коэффициента упругости, снижением перемещаемой массы и снижением темпа выполнения упражнения. Первые два параметра характеризуют конструкцию устройства, а темп относится к методике выполнения упражнения.

Использование для обеспечения тренировочной нагрузки сил диссипативного характера позволяет предположить относительно малую величину работы консервативных сил (сила тяжести). В таком случае анализ формулы (1) показывает, что коэффициент инерционности зависит от соотношения величин работ диссипативных сил и достигаемой перемещаемыми частями тренажера и звеньями тела человека кинетической энергии.

Если предположить, что x – это перемещение звена тела человека, контактирующего с рабочим элементом технического устройства, F – сила трения, а t – время выполнения упражнения, то коэффициент инерционности может быть приведен к следующему виду:

$$K_{in} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{2Ft^2}{mx}} \quad (5)$$

Ситуация в данном случае вполне очевидна. Повышение силы диссипативного сопротивления приводит к увеличению коэффициента инерционности. Снижение данного показателя может быть связано с увеличением перемещаемой массы, амплитуды движения и темпа выполняемого упражнения. К конструктивным параметрам устройства здесь относится величина силы диссипативного сопротивления, амплитуда движения и масса перемещаемых объектов. Темп выполнения упражнения относится к методическим характеристикам упражнения.

При высоких значениях диссипативного сопротивления и отсутствии массивных перемещаемых частей устройства значение коэффициента инерционности может достигать значений близких к единице, что недостижимо при использовании гравитационных сил.

Если при обеспечении тренировочной нагрузки используется сила вязкого сопротивления, ее величину можно представить как произведение cV^2 , где c – обобщенный коэффициент, зависящий от конструкции тела, перемещаемого в вязкой среде и обеспечивающего нагрузку, а V – его скорость. Подстановка такого выражения силы в формулу (5) позволяет получить следующее выражение:

$$K_{in} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{2cx}{m}} \quad (6)$$

Анализ полученного соотношения показывает, что коэффициент инерционности в данном случае имеет более высокие показатели при увеличении обобщенного коэффициента сопротивления c , определяемого конструкцией тренажера и амплитуды перемещения x , а его снижение происходит при увеличении перемещаемой массы. При этом темп выполнения упражнения не сказывается на величине рассматриваемого показателя.

Таким образом, различный характер используемых для обеспечения тренировочной нагрузки сил предполагает разное влияние конструктивных и методических элементов на величину коэффициента инерционности. Данные такого влияния сведены в таблицу 1.

В качестве коэффициента рассеивания K_{dis} механической энергии в упомянутой выше статье [1] предлагается использовать отношение работы диссипативных сил (A_{dis}) к сумме работ, затраченных на преодоление диссипативных (A_{dis}), консервативных (A_k) и инерционных сил (E_{kin}).

$$K_{dis} = \frac{A_{dis}}{A_{dis} + A_k + E_{kin}} \quad (7)$$

В случае использования гравитационных и упругих сил в традиционных технических устройствах, как правило, не предусматривается специального поглощения энергии их конструкциями. Она

утилизируется через опорно-двигательный аппарат занимающегося или поглощается конструкцией тренажера. Следовательно, при использовании таких систем коэффициент рассеивания энергии имеет значения близкие к нулевым, что отрицательно сказывается на специализированности выполняемых упражнений, вызывает дополнительное напряжение занимающегося и способствует быстрому износу конструкции тренажерного устройства.

Таблица 1

Конструктивные и методические параметры, оказывающие влияние на величину коэффициента инерционности при использовании механических сил различной природы (стрелками показано направление изменение коэффициента при увеличении параметра)

Сила тяжести	Сила упругости	Сила трения	Сила вязкости
t (↑)	t (↑)	t (↑)	c (↑)
h (↓)	k (↑)	F (↑)	x (↑)
	m (↓)	m (↓)	m (↓)
		x (↓)	

При использовании сил диссипативного характера, в случае незначительности консервативных сил, применяя введенные ранее обозначения для диссипативных сил, последняя формула может быть преобразована к виду:

$$K_{dis} = \frac{F}{F + \frac{mx}{2t^2}} \quad (8)$$

В случае использования сил вязкости выражение для коэффициента рассеивания может быть представлено следующим образом:

$$K_{dis} = \frac{1}{1 + \frac{m}{2cx}} \quad (9)$$

Анализ полученных выражений показывает, что общим конструктивным параметром, оказывающим влияние на значение коэффициента рассеивания, является перемещаемая при выполнении упражнения масса. Ее увеличение приводит к снижению коэффициента. В случае сухого трения значение последнего возрастает при уменьшении амплитуды упражнения и темпа (увеличения времени выполнения). Для силы вязкого трения увеличение перемещения и коэффициента вязкого сопротивления приводит к увеличению коэффициента рассеивания энергии.

Выводы и дальнейшая перспектива исследования. 1. Анализ биомеханических коэффициентов эффективности технических средств устройств, используемых для развития физических качеств показал, что параметры, оказывающие влияние на их величину могут быть разделены на конструктивные и методические. К конструктивным относятся масса перемещаемых частей устройства, амплитуда движения, сила сухого трения и соответствующие коэффициенты, определяющие силу упругости и вязкого трения. К методическим параметрам выполнения упражнения относятся темп, определяющий скорость выполняемого движения.

2. Коэффициент пространственной размерности при использовании традиционных технических устройств, конструктивно выделяющих одну нагружаемую поступательную или вращательную степень свободы, имеет величину 0,17 при максимальном значении соответствующем единице. Он может быть приближен к максимальному значению при использовании устройств, обеспечивающих нагрузку одновременно нескольких степеней свободы звена человека, контактирующего с рабочим элементом тренажера.

3. Величина коэффициента инерционности при использовании гравитационных сил отрицательно зависит от амплитуды движения и от темпа выполнения упражнения.

5. При использовании упругих сил коэффициент инерционности положительно зависит от коэффициента упругости деформируемого элемента и отрицательно от массы перемещаемых частей устройства. Снижение данного показателя происходит и при увеличении темпа выполнения упражнения.

6. При использовании диссипативных сил сухого и вязкого трения в обоих случаях отрицательное влияние на коэффициент инерционности оказывает увеличение перемещаемой массы. При сухом трении положительное влияние оказывает увеличение силы трения. Отрицательное влияние имеет амплитуда движения и темп выполнения упражнения. В случае вязкого трения амплитуда имеет положительное влияние, также как коэффициент вязкого сопротивления.

7. Коэффициент рассеивания энергии имеет максимальное значение при использовании для создания нагрузки диссипативных сил. Отрицательное влияние на его величину, как для сухого, так и для вязкого трения оказывает такой конструктивный элемент как величина перемещаемой массы. В случае сухого трения отрицательное значение имеет амплитуда выполняемого движения и его темп. При использовании вязкого трения амплитуда и коэффициент вязкого сопротивления, являясь конструктивными элементами, имеют положительное влияние на данный показатель.

8. На основании проведенного исследования показателей конструктивной эффективности технических устройств можно сделать заключение о высокой перспективе использования тренажеров со

многими степенями свободи, конструкції яких мають невелику масу і використовують для створення тренувальної навантаження дисипативні сили.

Использованные источники

1. Сотский Н.Б. Классификации технических средств физической культуры и оценка их эффективности на основе биомеханических принципов построения двигательных действий / Сотский Н.Б. // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 40–48
2. Назаров, В.Т. Движения спортсмена / В.Т. Назаров. – Минск: Полымя, 1984. – 176 с.
3. Сотский, Н.Б. Биомеханика: учебник для студентов специальности спорт.-пед. деятельность / Н.Б. Сотский; Белорус. гос. ун-т физ. культуры. – Минск: БГУФК, 2005. – 192 с.
4. Сотский, Н.Б. Кинематика и динамика выполнения упражнений на стационарных силовых тренажерах / Н.Б. Сотский // Наука и техника. – 2014. – № 4. – С. 87–94.
5. Скрипко А.Д. Технологии физического воспитания/А.Д. Скрипко.- Минск, ИСЗ, 2003.-284с
6. Сотский, Н.Б. О перспективе фрикционных тренажеров со многими степенями свободы / Н.Б. Сотский // Вісник Чернігівського національного педагогічного університету ім. Т.Г. Шевченка. Сер. Педагогічні науки. Фізичне виховання та спорт. – Чернігів: ЧНПУ, 2014. – Вип. 118. – Т. 2. – С. 58–63.

Sotsky M.

ON NUMERICAL INDICATORS OF BIOMECHANICAL EFFICIENCY OF TECHNICAL EQUIPMENT FOR THE DEVELOPMENT OF THE ATHLETE'S PHYSICAL QUALITIES

The aim of this work is to assess the influence of the nature of the force action, as well as the biomechanical parameters of the exercise performed using technical equipment on the coefficients of the biomechanical efficiency of the technical device used for the development of the athlete's physical qualities. The method of research is the theoretical analysis of simulator exercises based on the methods of classical biomechanics.

As a result of the research it was established that: The parameters that affect their magnitude can be divided into constructive and methodological. The design includes the mass of the moving parts of the device, the amplitude of motion, the force of dry friction and the corresponding coefficients determining the elastic and viscous friction forces. The methodical parameters of the exercise include the tempo that determines the speed of the movement.

The coefficient of spatial dimension when using traditional technical devices that constructively allocate one loaded translational or rotational degree of freedom has a value of 0.17 at the maximum value corresponding to 1. It can be approximated to the maximum value when using devices that load simultaneously several degrees of freedom of the person's link in contact with the working element of the simulator.

The magnitude of the inertia coefficient when using gravitational forces depends negatively on the amplitude of motion and on the exercise tempo.

When using elastic forces, the inertia coefficient depends positively on the elasticity coefficient of the deformable element and negatively on the mass of the moving parts of the device. This indicator also decreases with an increase in the exercise tempo.

When dissipative forces of either dry or viscous friction are used, the increase in the mass to be moved has a negative effect on the coefficient of inertia in both cases. With dry friction a positive effect is exerted by an increase in the frictional force, the amplitude of movement and the exercise tempo having a negative effect. In the case of viscous friction, the amplitude has a positive effect, as well as the coefficient of viscous resistance.

The energy dissipation factor has the maximum value when dissipative forces are used to create a load. A negative effect on its magnitude, for both dry and viscous friction, is provided by such a structural element as the value of the mass being moved. In the case of dry friction, the amplitude of the movement and its tempo have negative values. In the case of viscous friction, the amplitude and the coefficient of viscous resistance have a positive effect on this index as they are constructive elements.

On the basis of the conducted research on indicators of biomechanical efficiency of technical devices, a conclusion was made about the high perspective of the use of simulators with many degrees of freedom designed to possess a small mass and use dissipative forces to create a training load.

Key words: *simulator, spatial dimension, inertia, energy dissipation, biomechanical efficiency.*

Стаття надійшла до редакції 29.08.2017