

СОТСКИЙ Николай Борисович, д-р пед. наук, профессор

КОЗЛОВСКАЯ Ольга Николаевна

КОРСАК Мария Александровна

САМОЙЛЕНКО Наталья Сергеевна

*Белорусский государственный университет физической культуры,
Минск, Республика Беларусь*

БИОМЕХАНИКА ФИЗИЧЕСКИХ УПРАЖНЕНИЙ КАК ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ ДИСЦИПЛИНА

В статье обсуждаются педагогические аспекты современной биомеханики двигательных действий человека. Показана необходимость использования биомеханического моделирования для понимания связи управляющих движений в суставах с реализацией целевых установок физического упражнения. Предложено использовать управляющие движения в качестве основных объектов педагогического воздействия при обучении и совершенствовании двигательных действий.

Ключевые слова: биомеханика, педагогика, управляющие движения, моделирование, анализ, синтез.

BIOMECHANICS OF PHYSICAL EXERCISES AS A PEDAGOGICAL DISCIPLINE

The article discusses the pedagogical aspects of modern biomechanics of human motor actions. The need to use biomechanical modeling to understand the relationship between control movements in the joints and the implementation of physical exercise targets is shown. It is proposed to use control movements as the main objects of pedagogical influence in training and improving motor actions.

Keywords: biomechanics; pedagogy; control movements; modeling; analysis; synthesis.

Вопросы, связанные с выполнением двигательных действий человека в спортивной, трудовой деятельности и повседневной жизни постоянно находятся в поле внимания различных отраслей науки. Здесь имеется широкое поле деятельности для спортивных педагогов, физиологов, психологов и, конечно же, биомехаников. В данной статье хотелось бы рассмотреть особенности работы последних и обсудить современные перспективы дальнейшего развития методологии биомеханических исследований, связанных с изучением двигательных действий человека в сфере физической культуры.

Биомеханика физических упражнений характеризуется четкой педагогической направленностью. Это одно из стратегических направлений, связанное с самой постановкой задач исследования в рамках данной дисциплины. Оно обеспечивает не только объективное количественное и качественное описание физического упражнения в терминах механики, но и исследование закономерностей его построения

с использованием соответствующего понятийного аппарата.

Значительную часть исследований в биомеханике занимает кинематическое описание [1, 2, 7]. Оно, как правило, является первичной информацией, получаемой непосредственно из анализа реального физического упражнения. Этот раздел занимается внешней (геометрической) картиной происходящего двигательного действия, оставляя в стороне причины, вызывающие или изменяющие перемещение тела или его отдельных частей (точек) в пространстве. Здесь имеются свои подходы и методы.

Для биомеханического исследования в первую очередь необходимо запечатлеть (записать) выполняемое упражнение, чтобы впоследствии была возможность подробно рассмотреть самые различные его аспекты. В процессе развития технологий для этой цели ранее применялись различные виды кино и фотосъемки. К вариантам фотосъемки относились циклографическая, стробоскопическая, стереосъемка, двух и трехмерные их варианты. Во многих случаях

использовалась скоростная киносъемка. В последнее время такие способы оптической регистрации движений уже практически не используются, поскольку приоритет имеет цифровая видеосъемка, результаты которой удобно обрабатываются с использованием компьютерных технологий.

В ходе анализа кинематики на основе видеозаписи получают циклограммы движения, как правило, представляющие собой изображение выполнения упражнения антропоморфной моделью, образно выражаясь, «палочным человечком». В современных исследовательских системах компьютерная система часто сама строит такую модель практически в реальном масштабе времени.

В рамках кинематики определяются практически все визуально наблюдаемые кинематические характеристики: время, перемещение, скорость и ускорение характерных точек и целых звеньев, включая угловые аналоги этих параметров. На основе кинематических характеристик может быть осуществлен переход к динамике.

Динамика исследует причины возникновения или изменения движения тел [3]. В качестве таковых рассматриваются силы, представляющие собой количественные характеристики их взаимодействия. Связь кинематических и динамических параметров осуществляется через ускорение (линейное или угловое). В самом простом случае сила, воздействующая на материальную точку, определяется произведением ее ускорения на массу. Аналогичное можно сказать в отношении физического тела, только роль точки здесь играет ОЦМ, а в качестве массы используется масса всего тела.

При осуществлении биомеханического анализа в рамках кинематики возникает очевидная проблема. Смысл ее в том, что в результате кинематического исследования получают таблицы или графики координат определенных точек тела человека с привязкой по времени, на основании которых вычисляются их пространствен-

но-временные характеристики (скорость и ускорение). Последние позволяют определять параметры движения тела как целого, характеризуемого скоростью и ускорением общего центра масс (ОЦМ), но ничего не добавляют к пониманию происходящего с педагогической позиции, направленной на обучение упражнению, его совершенствованию и развитию конкретных двигательных качеств, обеспечивающих его успешное выполнение. Здесь исследователь видит лишь внешнюю картину (геометрию) выполнения двигательного действия, но не обладает информацией о том, какими собственными активными действиями исполнитель его реализовал.

Конечно, с элементарной точки зрения как будто все ясно. Тело человека начало перемещаться, т. е. получило ускорение, значит, на него подействовала сила, которую, зная массу и ускорение, можно легко вычислить. Здесь снова возникает проблема связи с педагогикой. Иными словами, есть заключение о действии силы, но нет ответа на то, каким образом опорно-двигательный аппарат человека ее обеспечил, организовав ансамбль из множества суставных движений. Таким образом, без установления иерархии этих составляющих кинематический анализ позволяет только сравнивать внешние картины исполнения физических упражнений, определять некоторые интегральные характеристики и в лучшем случае составлять статистические (идеальные) модели физического упражнения для сравнения с параметрами реального исполнителя [4].

Следует заметить, что даже если по кинематическим характеристикам попытаться установить динамические (сила, момент силы, энергетика), то получатся лишь усредненные данные, поскольку масс-инерционные характеристики исполнителя будут средне-статистическими (табличными), а звенья тела, как правило, будут рассматриваться как твердые тела без учета их вязко-упругих свойств.

Обобщая результаты, которые можно получить на базе кинематического исследования можно:

- определить исходный материал для биомеханического анализа (координаты заданных точек тела и суставные углы в виде функции времени);

- вычислить скорости и ускорения характерных точек, (линейные и угловые), скорость и ускорение ОЦМ;

- приближенно (с известной степенью точности) оценить интегральные динамические параметры, относящиеся к телу исполнителя в целом (внешние силы и моменты сил, энергетические характеристики).

Кроме биомеханического анализа на основе видеоматериалов биомеханика использует и инструментальные методы исследования физических упражнений, относящиеся как в кинематике, так и к динамике. Здесь наиболее распространенными являются гониометрия, тензодинамометрия, акселерометрия, и их комбинации [5].

Гониометрические устройства представляют значительный интерес в отношении оперативного определения характера суставных движений. С их помощью можно зафиксировать амплитудные, временные и пространственно-временные характеристики последних. Важность такого контроля, на наш взгляд, состоит в быстром и относительно точном получении исходных данных для построения моделей синтеза движений, а также объективном контроле суставных движений в процессе освоения и совершенствования исполнения физического упражнения.

В ходе контроля динамических характеристик используются так называемые тензоплатформы, измеряющие силы и моменты сил реакции опоры. Такие устройства определяют интегральные характеристики движения, например, ускорение ОЦМ, импульс и момент импульса всего тела, скорость нарастания усилия (взрывная сила). Несомненно, с помощью таких устройств можно достаточно точно и оперативно

определять и контролировать указанные характеристики, но без биомеханического анализа и синтеза движения тела человека как целого невозможно связать результаты с объектами возможного педагогического воздействия – суставными движениями. Такие же ограничения имеют место при использовании акселерометрических датчиков, которые измеряют ускорение точек своего расположения. Область использования последних также ограничивается оперативным контролем движения указанных точек без анализа полученных данных в связи с особенностями построения двигательного действия из элементарных составляющих.

Таким образом, инструментальные методики, несомненно, дают важную оперативную информацию о внешних характеристиках двигательного действия, но ее применимость ограничена отсутствием понимания степени участия конкретных суставных движений в достижении его цели. Указанные движения и являются основными объектами педагогического воздействия, связанными с обучением и совершенствованием исполнения физического упражнения, а также целенаправленным развитием специальных физических качеств.

Для определения роли суставных движений при выполнении двигательных действий используется специальная методология, называемая биомеханическим синтезом.

Ее использование в качестве первой задачи предполагает определение и формализацию цели физического упражнения. Здесь удобно следовать схеме исследования, предложенной профессором В.Т. Назаровым [6], согласно которой цель физического упражнения в рамках кинематики определяется заданием трех основных характеристик – программ места, ориентации и позы. Первая из указанных программ описывает характер перемещения ОЦМ тела, вторая – оценивает вращение тела, как целого и третья – динамику изменения суставных углов.

Если первые две программы дают непосредственную картину изменения конкретных параметров двигательного действия, то программа позы содержит внешнее описание средства, позволяющего его совершить. Этим средством является изменение суставных углов. Это единственное, что может сознательно делать человек, используя свои мышцы, и то, в какой последовательности и как он выполняет суставные движения, образует все многообразие его двигательной активности.

В биомеханике поза определяется и записывается с помощью матричной формы, представляющей собой таблицу, строки которой соответствуют биокинематическим цепям (пять цепей), а столбцы – суставным углам в этих, записываемым в соответствии со специальным алгоритмом [6, 7]. Если учитывать только крупные суставы, то пространственная матрица позы содержит 60 значений суставных углов (потенциально по 3 на сустав).

Именно определение позы и исследование ее динамики во время выполнения двигательного действия позволяет осуществить переход от биомеханики аналитической (описательной) к биомеханике педагогической. Здесь следует напомнить, что непосредственным объектом педагогического воздействия, как уже было сказано выше, не могут быть ни перемещения звеньев тела в пространстве, ни силы, его обеспечивающие, ни скорость с ускорением, а именно суставные движения, сознательно выполняемые самим человеком с использованием своих мышц.

Человек в процессе жизнедеятельности управляет своими движениями в суставах через напряжение тех или иных мышечных групп, корректируя его по ходу достижения поставленной цели. Важно отметить, что указанные движения выглядят одинаково (инвариантно) как для исполнителя, так и стороннего наблюдателя (тренера, зрителя) и могут быть зарегистрированы непосредственно во время выполнения упражнения или при анализе его записи. Оценка же

скорости, ускорения, силы, энергии, проявляемых в двигательном действии, требует дополнительных логических или математических операций. Например, чтобы количественно оценить ускорение и действующую силу необходимо найти вторую производную перемещения по времени и контроль воспроизведения исполнителем этих характеристик в процессе выполнения физического упражнения является достаточно трудной задачей, решение которой требует сложного контролирующего оборудования.

Другой проблемой здесь представляется различие систем отсчета исполнителя и наблюдающего со стороны тренера или зрителя. При выполнении двигательного действия спортсмен не может видеть себя со стороны и отсчитывает положение в пространстве относительно своего тела, а наблюдатель видит упражнение со стороны в системе отсчета, связанной, например, с беговой дорожкой или стенами помещения. В первом случае система отсчета является неинерционной (практически всегда имеется ускорение тела), а во втором – ее можно считать инерционной. В таких системах движение воспринимается по-разному и для одинакового понимания происходящего здесь опять же следует использовать язык суставных движений.

Таким образом, педагогическая биомеханика должна устанавливать связь между целевыми характеристиками физического упражнения и суставными движениями, представленными в описании позы исполнителя. При использовании такого подхода следует иметь в виду, что процессы, происходящие в суставах при выполнении двигательных действий подразделяются на две основные категории. Это управляющие движения (УД) и элементы осанки (ЭО). Первые из них – суставные движения, в результате которых образуются управляющие силы и моменты сил, а вторые связаны с мышечным ограничением подвижности определенной части суставов, превращающим многозвенный опорно-двигательный аппарат человека в механизм для выполне-

ния определенного действия. Управляющие движения играют роль двигателей, через которые системе сообщается механическая энергия. По степени важности они разделяются на главные и вспомогательные (по В.Т. Назарову – корректирующие). Используя представленные понятия, двигательное действие (ДД) можно представить в виде следующей символической формулы [4]:

$$\text{ДД} = \text{ЭО} + \text{УД}.$$

Следует отметить, что по степени важности управляющие движения делятся на главные, без которых осуществить двигательное действие невозможно и вспомогательные, которые используются для коррекции неточностей (корректирующие) или для улучшения или облегчения выполнения упражнения. Поэтому в ходе биомеханического исследования из всего многообразия суставных движений следует выделить главные управляющие движения и определить элементы осанки. Они и должны быть использованы как основные объекты педагогического воздействия.

Владея информацией об указанных биомеханико-педагогических составляющих двигательного действия, исследователь или педагог-тренер может эффективно организовать процесс освоения физического упражнения, придерживаясь строгой последовательности от освоения ЭО и главных УД к базисному выполнению упражнения и дальнейшему его совершенствованию с добавлением при необходимости вспомогательных УД [3, 6].

Другим важным аспектом использования указанных элементов двигательного действия является коррекция двигательных ошибок, причины которых, связанные с его выполнением, могут быть в осуществлении ЭО, выборе и выполнении УД.

Кроме этого, выявление главных УД позволяет воздействовать на эффективность выполнения упражнения путем организации тренировочного воздействия конкретно на силовые, скоростные и амплитудные особенности выполнения главных УД. Здесь

открывается целая область прикладных исследований, связанных с конструированием технических средств такого воздействия.

Подчеркивая принципиальную значимость рассмотренных выше объектов биомеханико-педагогического воздействия, следует очертить пути их выявления в ходе исследования конкретных физических упражнений. В этом отношении используются основной метод механики или биомеханики – моделирование. Моделирование в области биомеханики может быть как физическим, так и математическим.

Физическое моделирование предполагает исследование через упрощение рассматриваемой ситуации путем замены участвующих в упражнении объектов другими, более простыми, имеющими физическую природу. Например, при исследовании технического действия спортивной борьбы соперник может быть заменен манекеном или гимнаст, выполняющий упражнение – физической моделью с сокращенным количеством суставов. Физическим моделированием может быть создано тренировочное сопротивление, адекватное реальному, имеющему место в соревновательном упражнении. Обучение сложному двигательному действию также можно рассматривать как моделирование, поскольку первые шаги этого процесса осуществляются в искусственных (модельных) условиях. Следует заметить, что физическое моделирование в значительной мере упрощает реальные объекты и определение по его результатам указанных выше составляющих (ЭДО и УД) часто требует большого искусства.

Механико-математическое моделирование в большей степени приспособлено для выяснения ключевых составляющих двигательных действий. Оно предполагает работу с математической моделью, отражающей реальные процессы, которая представляет собой систему уравнений, описывающую кинематику и динамику происходящего упражнения на основе законов, выраженных в виде законов Ньютона или в форме, предложенной Лагранжем [5].

В ходе биомеханико-педагогического исследования основной подход именуется биомеханическим компьютерным синтезом двигательных действий. Он предполагает получение на основе биомеханического анализа реального двигательного действия зависимости суставных углов от времени (программа позы) и использование полученных данных в качестве задаваемых переменных, фигурирующих в уравнениях, описывающих закон движения.

Подстановка в закон движения реальных параметров суставных движений, а также начальных условий позволяет получить систему дифференциальных уравнений, описывающих изучаемое двигательное действие. Решение таких уравнений в современных условиях осуществляется на основе специальных компьютерных программ численного интегрирования и возможности такого синтеза появились только в последние два десятилетия с распространением быстродействующих персональных компьютеров.

Адекватность механико-математической модели можно оценить путем сравнения «компьютерного» исполнения упражнения и его видеозаписи. Если оба варианта совпадают в основных чертах (достижение цели), то дальнейшее исследование осуществляется введением вариаций в параметры суставных движений. Для этого последние удобно

представлять в виде гармонической функции времени (гармоническое приближение), позволяющей задавать нарастание и убывание скорости суставного движения, а также параметры амплитуды [6].

Исследование движения модели при введении вариаций позволяет установить иерархию суставных движений по степени влияния на достижение цели двигательного действия, оценить характер этого влияния и установить основные составляющие упражнения (главные УД и ЭДО). Кроме этого, модели синтеза позволяют оценивать влияние на эффективность выполнения двигательных действий антропометрических характеристик исполнителей, начальных условий, наличия или отсутствия силы тяжести, анализировать энергетику.

Таким образом, исследование двигательных действий на основе биомеханических подходов отвечает запросам спортивной педагогики только в случае органичного соединения анализа и синтеза. Это позволяет устанавливать основные составляющие двигательных действий (элементы динамической осанки и управляющие движения) и на их основе строить процесс обучения их исполнению, корректировать двигательные ошибки, определять стратегию педагогического воздействия на указанные составляющие с целью достижения более высоких результатов.

1. Дубровский, В. И. Биомеханика : учеб. для сред. и высш. учеб. заведений / В. И. Дубровский, В. Н. Федорова. – М. : ВЛАДОС-ПРЕСС, 2003. – 672 с.
2. Попов, Г. И. Биомеханика двигательной деятельности : учеб. для студентов учреждений высш. проф. образования / Г. И. Попов, А. В. Самсонова. – М. : Академия, 2011. – 320 с.
3. Сотский, Н. Б. Биомеханика : учеб. для студентов специальности «спортивно-педагогическая деятельность» / Н. Б. Сотский. – Минск : БГУФК, 2005. – 192 с.
4. Сотский, Н. Б. Теоретико-методические основы разработки фрикционных тренажеров со многими степенями : монография / Н. Б. Сотский. – Минск : БГУФК, 2018. – 227 с.
5. Загrevский, В. И. Биомеханика физических упражнений : учеб. пособие / В. И. Загrevский, О. И. Загrevский. – Томск : ТМЛ-Пресс, 2007. – 274 с.
6. Назаров, В. Т. Движения спортсмена / В. Т. Назаров. – Минск : Полымя, 1984. – 176 с.
7. Susan, J. Hall Basic Biomechanics / J. Susan // Seventh Edition. – New York, NY : McGraw-Hill Education, 2 Penn Plaza. – 2015. – 539 p.
8. Сотский, Н. Б. Поза человека и ее аналитическое представление / Н. Б. Сотский // Вісник Чернігівського національного педагогічного університету ім. Т. Г. Шевченка. Сер. Педагогічні науки. Фізичне виховання та спорт ; гол. ред. М. О. Носко. – Чернігів, 2018. – Вип. 154. – Т. 1. – С. 9–15.
9. Назаров В. Т. Аналитическое представление движений спортсмена / В. Т. Назаров // Вопросы теории и практики физической культуры. – Вып. 14. – Минск, 1984. – С. 121–123.