

УДК 796.012(075.8)

Сотский Н. Б.

ORCID 0000-0001-9835-1068

Доктор педагогических наук, доцент,
заведующий кафедрой биомеханики,
Белорусский государственный университет физической культуры
(Минск, Республика Беларусь) E-mail: nsotsky@gmail.com

БИОМЕХАНИКА ФИЗИЧЕСКИХ УПРАЖНЕНИЙ КАК ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ ДИСЦИПЛИНА

Цель работы. Работа посвящена анализу современных научных подходов, используемых в области биомеханики физических упражнений и обсуждению перспектив дальнейшего развития этой дисциплины с учетом появления новых идей и технологий.

Методология. Основными методологическими подходами при подготовке данной статьи являлся анализ литературы, обобщение собственного опыта педагогических исследований, опрос и обсуждение проблемы с ведущими специалистами в области биомеханики физических упражнений.

Научная новизна. В статье систематизирована информация о современном состоянии проблемы биомеханических исследований в области физических упражнений человека, критически рассмотрены теоретические и экспериментальные подходы к объективному пониманию основ осуществления целенаправленных движений, показана перспектива методов биомеханического компьютерного синтеза, как основы установления основных биомеханико-педагогических составляющих двигательного действия – элементов осанки и управляющих движений.

Выводы. Исследование двигательных действий на основе биомеханических подходов отвечает запросам спортивной педагогики только в случае органичного соединения анализа и синтеза. При этом синтез на основе использования современных компьютерных технологий является эффективным средством установления основных биомеханико-педагогических составляющих двигательных действий (элементов осанки и управляющих движений в суставах). Результаты такого исследования, сочетающего биомеханический анализ и компьютерный синтез, позволяют эффективно строить процесс обучения исполнению физических упражнений, корректировать двигательные ошибки и определять стратегию педагогического воздействия на указанные составляющие с целью достижения более высоких результатов. Построение и использование методов, связанных с биомеханическим компьютерным синтезом физических упражнений представляется перспективным направлением дальнейшего развития педагогической биомеханики.

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

Постановка проблемы. Вопросы, связанные с эффективным 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. Следует отметить, что именно понятиями биомеханики определяется сущность двигательного действия и его цель. В рамках этой науки устанавливаются причинно-следственные связи между механическими закономерностями функционирования опорно-двигательного аппарата и особенностями достижения поставленной цели, связанной с осуществлением целенаправленного перемещения тела как целого и его частей в процессе выполнения физического упражнения. Естественно, для постановки новых задач и построения инновационных методов исследования движений человека необходима объективная оценка биомеханико-педагогических подходов с современных позиций с определением перспектив их дальнейшего развития. Поэтому актуальной задачей представляется рассмотрение особенностей работы специалистов в области биомеханики и обсуждение современных перспектив дальнейшего развития методологии биомеханических исследований, связанных с изучением двигательных действий человека в сфере физической культуры.

Цель настоящей работы – анализ современных подходов биомеханики физических упражнений и обсуждение перспектив дальнейшего ее развития с учетом появления новых идей и технологий.

Методологія дослідження. Основними методологічними підходами при підготовці даної статті являвся аналіз літератури, обобщення власного досвіду педагогічних досліджень, опрос і обговорення проблеми з ведучими спеціалістами в області біомеханіки фізичних упражнень.

Научна новизна. В статті систематизована інформація про сучасний стан проблеми біомеханічних досліджень в області фізичних упражнень людини, критично розглянуті теоретичні та експериментальні підходи до об'єктивного розуміння основ виконання цілеспрямованих рухів, показано перспективу методів біомеханічного комп'ютерного синтезу, як основи встановлення основних біомеханіко-педагогічних складових рухової діяльності – елементів осанки та керуючих рухів.

Результати дослідження. Біомеханіка фізичних упражнень характеризується чіткою педагогічною спрямованістю. Це одне з стратегічних напрямків, пов'язаних з самою постановкою завдань дослідження в межах даної дисципліни. Воно забезпечує не тільки об'єктивне кількісне та якісне описання фізичного упражнення в термінах механіки, але й дослідження закономірностей його побудови з використанням відповідного понятійного апарату.

Значущу частину досліджень в біомеханіці займає кінематичне описання [1; 2; 7]. Воно, як правило, являється первинною інформацією, отриманою безпосередньо з аналізу реального фізичного упражнення. Цей розділ займається зовнішньою (геометричною) картиною відбуваючого рухової діяльності, залишаючи в стороні причини, викликаючі або змінюючі переміщення тіла або його окремих частин (точок) в просторі. Тут існують свої підходи та методи.

Для біомеханічного дослідження в першу чергу необхідно зафіксувати (записати) виконуване упражнение, щоб внаслідок цього була можливість детально розглянути найважливіші його аспекти. В процесі розвитку технологій для цієї мети раніше застосовувалися різні види кіно та фотозйомки. До варіантів фотозйомки відносилися циклографічна, стробоскопічна, стереозйомка, двох та тривимірні її варіанти. В багатьох випадках застосовувалася швидкісна кінозйомка. В останнє час такі методи оптичної реєстрації рухів уже практично не використовуються, оскільки пріоритет має цифрова відеозйомка, результати якої зручно обробляються з використанням комп'ютерних технологій.

В процесі аналізу кінематики на основі відеозапису отримують циклограми рухів, як правило, що представляють собою зображення виконання упражнення антропоморфною моделлю, образно виражаючи, «палочним чоловічком». В сучасних дослідницьких системах комп'ютерна система часто сама будує таку модель практично в реальному масштабі часу.

В межах кінематики визначаються практично всі візуально спостережувані кінематичні характеристики: час, переміщення, швидкість та прискорення характерних точок та цілих зв'язок, включаючи кутові аналоги цих параметрів. На основі кінематичних характеристик може бути здійснено перехід до динаміки.

Динаміка досліджує причини виникнення або зміни рухів тіл [3]. В якості таких розглядаються сили, що представляють собою кількісні характеристики їх взаємодії. Зв'язок кінематичних та динамічних параметрів здійснюється через прискорення (лінійне або кутове). В найпростішому випадку сила, що діє на матеріальну точку, визначається добутком її прискорення на масу. Аналогічно можна сказати про фізичне тіло, де роль точки тут грає ОЦМ, а в якості маси використовується маса всього тіла.

При виконанні біомеханічного аналізу в межах кінематики виникає очевидна проблема. Суть її в тому, що в результаті кінематичного дослідження отримуються таблиці або графіки координат певних точок тіла людини з прив'язкою до часу, на основі яких обчислюються їх просторово-часові характеристики (швидкість та прискорення). Останні ж дозволяють визначати параметри рухів тіла як цілого, характеризуваного швидкістю та прискоренням загального центру мас (ОЦМ), але нічого не додають до розуміння відбуваючого з педагогічної позиції, спрямованого на навчання упражненню, його вдосконаленню та розвитку конкретних рухових якостей, що забезпечують його успішне виконання. Тут дослідник бачить лише зовнішню картину (геометрію) виконання рухової діяльності, але не має інформації про те, якими власними активними діями виконавець її реалізує.

Конечно, з елементарної точки зору як би все ясно. Тіло людини почало переміщатися, т.е. отримало прискорення, значить, на нього подействувала сила, яку, знаючи масу та прискорення, можна легко обчислити. Тут знову виникає проблема зв'язку з педагогікою. Іншими словами, є висновок про дію сили, але немає відповіді на те, яким чином опорно-руховий апарат людини її забезпечив, організувавши ансамбль з багатьох зв'язаних рухів. Таким чином, без встановлення ієрархії цих складових кінематичний аналіз дозволяє тільки порівнювати зовнішні картини виконання фізичних упражнень, визначати деякі інтегральні характеристики та в найкращому випадку складати статистичні (ідеальні) моделі фізичного упражнення для порівняння з параметрами реального виконавця [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, приведем данные, которые можно получить на базе кинематического исследования:

- 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 анализа на основе видеоматериалов биомеханика использует и инструментальные методы исследования физических упражнений, относящиеся как у 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 сложной 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 неинерциальной (практически всегда имеется ускорение тела), а во втором – ее можно считать инерциальной. В таких системах движение воспринимается по-разному и для одинакового понимания происходящего здесь опять 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 выполнения определенного действия. Управляющие движения играют роль двигателей, через которые системе сообщается механическая энергия. 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]: $ДД = ЭО + УД$.

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 [7].

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.

Выводы. Исследование двигательных действий на основе биомеханических подходов отвечает запросам спортивной педагогики только в случае органичного соединения анализа и синтеза. При этом синтез на основе использования современных компьютерных технологий является эффективным средством установления основных биомеханико-педагогических составляющих двигательных действий (элементов осанки и управляющих движений в суставах). Результаты такого исследования, сочетающего биомеханический анализ и компьютерный синтез, позволяют эффективно строить процесс обучения исполнению физических упражнений, корректировать двигательные ошибки и определять стратегию педагогического воздействия на указанные составляющие с целью достижения более высоких результатов. Построение и использование методов, связанных с биомеханическим компьютерным синтезом физических упражнений представляется перспективным направлением дальнейшего развития педагогической биомеханики.

References

1. Дубровский В. И., Федорова В. Н. Биомеханика : учеб. для сред. и высш. учеб. заведений. Москва : ВЛАДОС-ПРЕСС, 2003. 672 с.
Dubrivskij, V. I., Fedorova, V. N. Biomehanika [Biomechanics]. Moscow, Russia : VLADOS-PRESS, 2003.
2. Попов Г. И., Самсонова А. В. Биомеханика двигательной деятельности : учеб. для студентов учреждений высш. проф. образования Москва : Академия, 2011. 320 с.
Popov, G. I., Samsonova A. V. (2011). Biomehanika dviatelnoj dejatelnosti [Biomechanics of Motor Activity]. Moscow, Russia : Akademija.
3. Сотский Н. Б. Биомеханика : учеб. для студентов специальности «спортивно-педагогическая деятельность». Минск : БГУФК, 2005. 192 с.
Sotsky, M. V. (2005). Biomehanika [Biomechanics] Minsk, Belarus: BGUFK.
4. Сотский Н. Б. Теоретико-методические основы разработки фрикционных тренажеров со многими степенями: монография. Минск : БГУФК, 2018. 227 с.
Sotsky, M. V. (2018). Teoretiko-metodicheskie osnovy razrabotki frikcionnih trenagorov so mnogimi stepenjami svobody [Theoretic and methodical foundations for the development of frictional simulators with many degrees of freedom]: monografija. Minsk, Belarus : BGUFK.

5. Загrevский В. И., Загrevский О. И. Биомеханика физических упражнений : учеб. пособие. Томск : ТМЛ-Пресс, 2007. 274 с.
Zagrevskij, V. I., and Zagrevskij, O. I. (2007). Biomechanika fizicheskikh upraznenezj [Biomechanics of Exercise]. Tomsk, Russia : TML-Press.
6. Назаров В. Т. Движения спортсмена. Минск : Полымя, 1984. 176 с.
Nazarov, V. T. (1984). Dvizenija sportsmena [Athlete's movements]. Minsk, Belarus : Polimja.
7. Hall, Susan J. (2015). Basic Biomechanics. Seventh Edition. New York, NY : McGraw-Hill Education, 2 Penn Plaza.
6. Сотский Н. Б. Поза человека и ее аналитическое представление. *Вісник Чернігівського національного педагогічного університету ім. Т. Г. Шевченка. Серія: Педагогічні науки. Фізичне виховання та спорт* ; гол. ред. М. О. Носко. Чернігів, 2018. Вип. 154. Т. 1. С. 9–15.
Sotsky, M. B. (2018). Poza cheloveka I ee analiticheskoe predstavlenie [The posture of the person and its analytical presentation] *Visnyk Chernihivskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu im. T. H. Shevchenka. Serii: Pedahohichni nauky. Fizychnе vykhovannia ta sport – Bulletin of the Chernihiv National T. G. Shevchenko Pedagogical University. The Series: Pedagogical sciences. Physical education and sports*, 154 (1), 9–15.
7. Назаров В. Т. Аналитическое представление движений спортсмена *Вопросы теории и практики физической культуры*. Вып. 14. Минск, 1984. С. 121–123.
Nazarov, V. T. (1984). Analiticheskoe predstavlenie dvizhenij sportsmen [Analytical representation of the athlete's movements]. *Voprosi teorii i praktiki fizicheskoi kulturi – Questions of theory and practice of physical culture*, 14, 121–123.

Sotsky M.

ORCID 0000-0001-9835-1068

Doctor of Pedagogical Sciences, Associate Professor
Head of the Department of Biomechanics
Belarusian State University of Physical Culture
(Minsk, Republic of Belarus) E-mail: nsotsky@gmail.com

BIOMECHANICS OF PHYSICAL EXERCISE AS A PEDAGOGICAL DISCIPLINE

Article's purpose. *The work is devoted to analysing modern scientific approaches used in the field of biomechanics of exercise and discussing the prospects for further development of this discipline, taking into account the emergence of new ideas and technologies.*

Methodology. *The main methodological approaches in the preparation of this article were analysis of literature, generalization of one's own experience of pedagogical research, a survey and discussion of the problem with leading specialists in the field of biomechanics of exercise.*

Scientific novelty. *The article organizes information about the current state of the problem of biomechanical research in the field of human exercise, critically considers theoretical and experimental approaches to objective understanding of the basics of purposeful movements, shows the perspective of methods of biomechanical computer synthesis, as the basis for the establishment of the main biomechanico-pedagogical components of motor action – elements of posture and control movements.*

Conclusions. *The study of motor actions based on biomechanical approaches meets the needs of sports pedagogy only in the case of an organic combination of analysis and synthesis. At the same time, synthesis based on the use of modern computer technologies is an effective means of establishing the main biomechanico-educational components of motor actions (elements of posture and control movements in joints). The results of this study, combining biomechanical analysis and computer synthesis, allow to effectively build the process of training performance of exercise, correct motor errors and determine the strategy of pedagogical impact on these components in order to achieve better results. The construction and use of methods related to biomechanical computer synthesis of exercise seems to be a promising direction for the further development of pedagogical biomechanics.*

Key words: *biomechanics, pedagogy, modeling, analysis, synthesis.*

Стаття надійшла до редакції 17.10.2020 р.

Рецензент: доктор педагогічних наук, професор В. А. Коледа