УДК 612.766/797.2 DOI: 10.36028/2308-8826-2022-10-1-70-78

БИОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СРЕДЫ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ДВИГАТЕЛЬНЫХ ДЕЙСТВИЙ: ОБЗОР КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ ПОДХОДОВ

А.А. Померанцев[1], П.И. Яковлева[1], Е.А. Высоцкая[2]

[1]ФГБОУ ВО «Липецкий государственный педагогический университет имени П.П. Семенова-Тян-Шанского», Липецк, Россия
[2]ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Липецк, Россия

Аннотация

Цель – выявить особенности различных подходов к учёту влияния среды на выполнение двигательных действий.

Методы исследования. Для определения преимуществ, недостатков и ограничений различных подходов анализировалась научная литература. Вместе с тем для более глубокого понимания функциональности различных методов было проведено их непосредственное тестирование на конкретных примерах (in silico). Основным методом являлся метод компьютерного моделирования, включающий: 3D-моделирование тела человека, моделирование действующих гидродинамических сил, моделирование кинематики движения в среде.

Результаты. В статье представлены четыре подхода для оценки влияния среды на выполнение двигательных действий: 1) качественный аналитический подход; 2) подход на основе суммировании моментов сил в системе рычагов двигательного аппарата человека; 3) подход на основе вычислительной гидродинамики; 4) подход на основе рекуррентного физико-математического моделирования. Наиболее оперативным является качественный аналитический подход, основанный на сопоставлении направлений движения и векторов действия сил. Такой подход позволяет получить принципиальный ответ, способствуют или препятствуют гидродинамические силы выполнению двигательного действия, без точных количественных значений. Подход на основе расчета моментов сил позволяет определять нагрузку на сжатие и скручивание в конкретных суставах, однако применим только для статических или медленных движений. Вычислительная гидродинамика позволяет непосредственно увидеть процесс обтекания неподвижного движителя средой и точно рассчитать действующие гидродинамические силы. Однако подход не учитывает влияние самих сил на движитель, а также не позволяет смоделировать сложные траектории движения. Подход на основе рекуррентного физико-математического моделирования является наиболее универсальным, позволяющим рассчитывать кинематику движения. Подход имеет большие перспективы за счет возможности надстройки алгоритма и дополнения его необходимыми переменными и коэффициентами.

Заключение. Очевидно, что полноценный анализ влияния среды на выполнение двигательного действия требует комплексного применения всех четырех представленных подходов.

Ключевые слова: водная среда, биомеханика, физическая нагрузка, гидродинамика, аэродинамика, моделирование, CFD-модель, рекуррентный подход.

BIOMECHANICAL ANALYSIS OF THE ENVIRONMENT INFLUENCE ON MOTOR ACTIONS: CONCEPTUAL APPROACHES REVIEW

A.A. Pomerantsev[1], ldclipetsk@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4197-2183
P.I. Yakovleva[1], yeahyeah11@mail.ru, ORCID: 0000-0002-1718-6011
E.A.Vysotskaya[2], k.chesnokova@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5428-7156
[1]Lipetsk State Pedagogical University named after P.P. Semenov-Tyan-Shansky, Lipetsk, Russia
[2]Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract

The purpose of the research is to identify the features of different approaches of environment influence on motor actions.

Research methods. To determine the advantages, disadvantages and limitations of different approaches we analyzed the scientific literature. At the same time, for a deeper understanding of the

functionality of various methods, they were directly tested on specific examples (in silico). The main method was computer modeling, including: 3D human body modeling, hydrodynamic forces modeling, modeling of motion kinematics in the environment.
Research results. The article presents four approaches for assessing the environment influence on motor actions: 1) a qualitative analytical approach; 2) an approach based on the summation of forces in the system of levers of the human motor apparatus; 3) an approach based on computational fluid dynamics (CFD); 4) an approach based on recurrent physical and mathematical modeling.
The most efficient is a qualitative analytical approach based on a comparison of the movement directions and forces action vectors. This approach allows getting a fundamental answer whether hydrodynamic forces contribute or hinder motor action without precise quantitative values.
The approach based on the summation of forces allows determining the load on compression and twisting in specific joints. However it is applicable only for static or slow movements. Computational fluid dynamics (CFD) approach allows directly watching the flowing process and accurately calculating the nhydrodynamic forces. However, the approach does not take into account the influence of forces themselves on the propulsion and does not allow modeling complex trajectories of movement.
The approach based on recurrent physical and mathematical modeling is the most universal because it let to calculate the motion kinematics. The approach has great prospects due to the possibility of configuring the algorithm and supplementing it with the necessary variables and coefficients.
Conclusion. It is obvious that a complete analysis of the environment influence on the motor actions requires the use of all four presented approaches.
Keywords: aquatic environment, biomechanics, physical activity, hydrodynamics, aerodynamics, modeling, CFD-modeling, recurrent approach.

ВВЕДЕНИЕ

В современном спорте высших достижений продолжается поиск новых путей совершенствования подготовки спортсменов, в том числе поиск новых средств и методов тренировки.

Благодаря тому что в водную среду можно перенести имитацию практически любого двигательного действия, такой метод создания дополнительной нагрузки можно рассматривать как универсальный во многих видах спорта. Однако для его применения необходимо четко понимать, что водная среда может полностью менять структуру движения по причине действия дополнительных гидродинамических сил [1].

В физике сплошных сред существуют различные безразмерные критерии подобия, позволяющие сопоставлять поведение физического объекта в различных средах, варьируя некоторыми показателями [10]. Например, число Рейнольдса определяет характер потока (ламинарный или турбулентный), исходя из скорости движения среды, её плотности и вязкости. Благодаря этому поведение самолета на высоких скоростях можно узнать, смоделировав обтекание его модели на меньших скоростях более вязкой и плотной средой (в воде). В зависимости от задачи также используются другие критерии подобия: Фруда, Струхаля, Маха.

Для ученых-теоретиков в области спорта большой интерес представляет установление критериев подобия для двигательной активности человека, которые бы позволили сопоставлять, а также взаимно заменять движения в воде и на суше. Для тренеров-практиков важно понимание того, какое влияние оказывают упражнения в воде на двигательный аппарат, нервную, дыхательную, сердечно-сосудистую системы, опорно-двигательный аппарат.

Цель исследования – выявить особенности различных подходов к учету влияния среды на выполнение двигательного действия.

Задачи:

1. Сравнить воздушную и водную среды по физическим характеристикам.
2. Выявить влияние внешних сил на выполнение двигательного действия.
3. Выявить преимущества, недостатки и ограничения различных подходов для оценки влияния среды на двигательное действие.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ:

1) анализ научной литературы;
2) методы компьютерного моделирования, включая 3D-моделирование тела человека, моделирование действующих гидродинамических сил средствами вычислительной гидродинамики, моделирование кинематики движения в среде на основе рекуррентного физико-математического моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В силу различных физических характеристик воды и воздуха выполнение двигательных действий и биомеханизмы передвижения в них будут принципиально отличаться (таблица 1).

1. Качественный аналитический подход к оценке влияния водной среды на выполнение двигательных действий

Действующие на тело человека в воде силы разнонаправленны, причем вектор действия гидродинамических сил определяется направлением движения и профилем перемещающегося сегмента (таблица 2).

Проводя мыслительный эксперимент с выполнением различных типов движений в воде (статические, ударные, циклические, тяговые, баллистические), можно прийти к следующим заключениям: 1) только сила лобового сопротивления однозначно создает дополнительную нагрузку на двигательный аппарат; 2) действие силы тяжести не зависит от среды; 3) действие выталкивающей и подъемной сил неоднозначно, так как они могут как увеличивать, так и снижать нагрузку.

Для полного понимания влияния водной среды на решение двигательной задачи необходимо учитывать направление самого движения: 1) если направление внешней силы совпадает с направлением движения, то сила способствует его выполнению, нагрузка на двигательный аппарат снижается; 2) если действующая внешняя сила не совпадает с направлением движения, то она создает дополнительную нагрузку.

Таблица 1 – Наиболее значимые характеристики, определяющие особенности передвижения в воздушной и водной средах
Table 1 – The most significant characteristics determining the features of movement in air and water environments

Характеристика / Characteristics	Вода / Water	Воздух / Air
Плотность, кг/м^3 / Density, kg/m^3	998	1,3
Вязкость, Па·с / Viscosity, Pa·s	$8{,}90 \cdot 10^{-4}$	$1{,}78 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2 – Действующие силы и их влияние на выполнение двигательного действия в различных средах
Table 2 – Active forces and their influence on the performance of motor actions in various environments

Силы / Forces	Вектор действия / Vector of action	Среда / Environment	
		водная/water	воздушная /air
Тяжести / Gravity	Вертикально вниз / Vertically down	Не зависит / Does not depend	
Тяги мышц / Pulling muscles	Произвольный / Arbitrary	Не зависит / Does not depend	
Выталкивающая / Buoyance	Вертикально вверх / Vertically up	Существенна Essential	Ничтожно малая Negligible
Лобового сопротивления / Motion drag	Противоположно направлению движения / Is opposite to the direction of movement	Существенна Essential	Ничтожно малая при невысоких скоростях Negligible at low speeds
Подъемная / Lifting	Перпендикулярно направлению с учетом профиля и ориентации движителя / Perpendicular to the direction according to the profile and orientation of the mover	Существенна Essential	Ничтожно малая при невысоких скоростях Negligible at low speeds

Большее количество действующих сил в воде ведет к возрастанию сложности их согласования, что неминуемо ведет к увеличению координационной сложности движения [9].

Изменение нагрузки в воде может способствовать, а может препятствовать выполнению двигательного действия и решению двигательной задачи. Например, полноценная имитация бега под водой невозможна ввиду преобладающей выталкивающей силы над силой тяжести.

Сопротивление среды, замедляя движение одного сегмента, может способствовать продвижению всего тела вперед. Такое движение происходит при гребке, осуществимом ввиду физических характеристик лишь в водной среде. Так, в исследовании [4] показано, что при выполнении гребка высококлассным байдарочником возникающие гидродинамические силы практически полностью проецируются на ход лодки, способствуя её продвижению и решению двигательной задачи.

Качественный аналитический подход является наиболее оперативным в понимании влияния водной среды на биомеханику выполнения двигательного действия, хотя и не даёт точных числовых значений.

2. Количественный подход для анализа статических положений на основе суммирования моментов сил в системе рычагов двигательного аппарата

Важной действующей силой в водной среде является выталкивающая сила, которая приложена к центру объема. Центр объема – точка, которая совпала бы с центром масс при условии однородности тела. Очевидно, что тело человека неоднородно, поэтому центр тяжести не совпадает с центром объема, что ведет к возникновению скручивающих моментов и перераспределению межмышечных напряжений.

Движения в суставах относятся к вращательным движениям, поэтому условие равновесия биомеханической системы определяется сложением системы моментов сил [2, 5].

При определении момента силы тяжести необходимо учитывать только массу сегментов, расположенных выше центра рассматриваемого сустава. Также следует принимать во внимание, является ли рассматриваемая биомеханическая цепь открытой или замкнутой.

Последовательность операций для определения моментов сил в рабочих суставах включает: 1) определение координат рабочих суставов; 2) определение координат

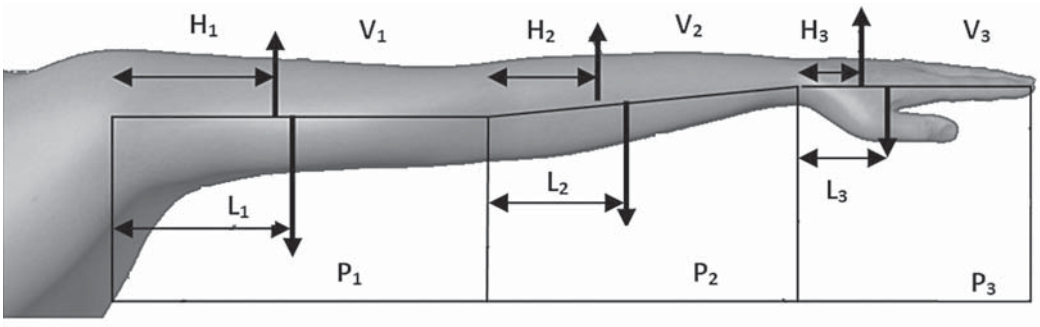


Рисунок 1 – Схематичное представление верхней конечности как системы моментов сил
Обозначения: Ln – плечо силы тяжести, Pn – вес сегмента, Hn – плечо выталкивающей силы, Vn – объем сегмента
Figure 1 – Schematic representation of the upper limb as a system of moments of forces
Designations: Ln – gravity shoulder, Pn – segment weight, Hn – ejection force shoulder, Vn – segment volume

центра преодолеваемой массы; 3) определение момента силы тяжести для конкретного сустава как произведение силы тяжести на плечо действия силы; 4) определение объемов сегментов, входящих в биомеханическую цепь; 5) определение центров объема биомеханической цепи; 6) определение момента выталкивающей силы; 7) определение суперпозиции выталкивающей силы и силы тяжести.

Данный подход может быть использован для анализа медленных или статических движений.

При рассмотрении на плоскости (2D) такой подход может быть реализован в виде расчетно-графической работы с использованием регрессионных моделей; пространственный анализ (3D) требует применения специализированных компьютерных приложений для оцифровки видео, трекинга и 3D-моделирования.

3. Количественный подход к определению влияния среды на основе методов вычислительной гидродинамики

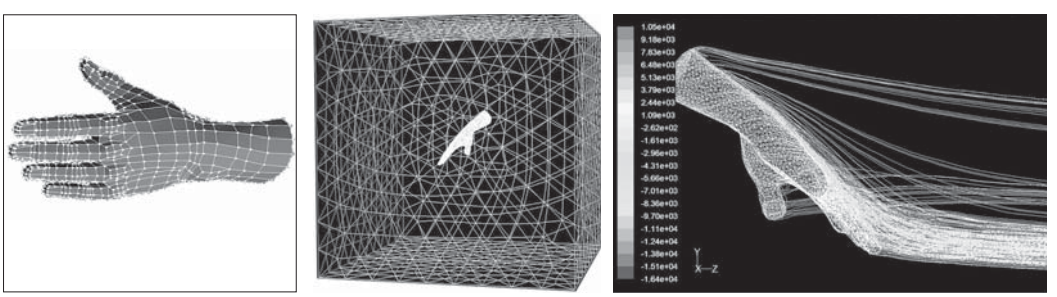
Для понимания особенностей передвижения в воде необходимо знать закономерности проявления подъемной силы и силы лобового сопротивления. Следует отметить, что прямые динамометрические методы либо сложны, либо способны показать лишь равнодействующую силу без демонстрации отдельных составляющих сил.

Современным методом, позволяющим рассчитать особенности взаимодействия объекта с набегающим потоком газа или жидкости без проведения натурных экспериментов, является метод компьютерного моделирования жидкой динамики (CFD – Computational Fluid Dynamics).

Данный метод примечателен тем, что позволяет учесть физические особенности потока и форму обтекаемого объекта, а изменив в модели свойства воды на воздух, можно оценить разницу [11]. Примеры использования CFD-моделей для анализа спортивных движений представлены в ряде работ [6, 7, 8, 14, 15].

В работе [2] была поставлена задача выявить особенности взаимодействия кисти спортсмена с потоком воды. Для решения задачи была создана пространственная 3D модель кисти пловца на основе 3D сканирования кисти мастера спорта по плаванию (рисунок 2а).

Для воссоздания процесса обтекания кисти водой был смоделирован канал с набегающим потоком жидкости (рисунок 2б). Виртуальная модель канала строилась по принципу обратимости движения, то есть для решения данной задачи не имеет значения, движется ли кисть в покоящейся жидкости или поток набегает на неподвижную кисть. Моделирование позволило выявить распределение давления по поверхности кисти, установить особенности движения потока вокруг кисти, а также опреде-



а б в

Рисунок 2 – CFD-моделирование обтекания водой кисти пловца
Figure 2 – CFD-modeling of water flow around a swimmer's hand

лить гидродинамические коэффициенты (рисунок 2в).

CFD-моделирование идеально подходит для решения представленной задачи, так как позволяет проводить виртуальные эксперименты, меняя исходные физические параметры среды, потока и движителя. Вместе с тем недостатком данного метода является принцип обратимости, который справедлив только для поступательных движений. Движение в суставе – вращательное по своей природе, таким образом, данный подход применим только к дистальному сегменту биомеханической цепи, движущемуся поступательно и лишь на некоторых участках сложных траекторий движения. Еще более весомым недостатком метода является то, что он не учитывает изменение скорости самого объекта и его ориентации под действием гидродинамических сил.

4. Количественный подход, основанный на рекуррентном физико-математическом моделировании

Для плавания и гребли важно, какое влияние действующие силы оказывают на скорость передвижения, так как именно этот показатель является целевым в двигательной задаче.

Рекуррентный подход позволяет учесть систему влияющих факторов в динамике её развития [12, 13, 16]. Например, под действием гидродинамических сил снижается скорость движения биомеханической гребной системы, это ведет, согласно (1), к снижению сопротивления, что, согласно зависимости А.В. Хилла (2), ведет к возможности большего приложения силы, что, в свою очередь, ведет к увеличению скорости биомеханической системы, и так далее. Профиль движителя и углы атаки также меняются на протяжении движения, изменяя структуру действующих гидродинамических сил и оказывая влияние на скорость передвижения. Система взаимных влияний уравновешивается при некоторых значениях переменных. Данный цикл расчета повторяется для каждого последующего момента времени на основе предшествующих значений.

Подобный подход представлен в работе [3], в которой моделируется прохождение дистанции в гребле на байдарках в условиях действия аэро- и гидродинамических факторов.

Каждый гребок разграничивается на Δt – одинаковые малые временные интервалы. Квадратичная зависимость сил аэро- и гидродинамического сопротивления от скорости лодки позволяет составить рекуррентное соотношение между скоростью на предшествующем $V_{(i-1)}$ временном интервале и скоростью V_i на последующем i-м интервале:

$$V_i = V_{i-1} + \frac{F_{Hill}}{m} \times \Delta t - V_{i-1}^2 \times \frac{K_a}{m} \times \Delta t - V_{i-1}^2 \times \frac{K_g}{m} \times \Delta t \quad (1)$$

$$F_{Hill} = ((F_{stat} + a) * b) / (v_{(i-1)} + b) - a \quad (2)$$

где

m – масса биомеханической гребной системы;

K_a – обобщенный коэффициент аэродинамического сопротивления;

K_g – обобщенный коэффициент гидродинамического сопротивления;

F_{Hill} – сила гребка в зависимости от скорости движения лодки;

F_{stat} – сила гребка, определенная в изометрическом режиме;

a, b – коэффициенты характеристического уравнения А.В. Хилла.

Результаты расчета с использованием представленного алгоритма, реализованного в виде компьютерной программы, демонстрируют удовлетворительное соответствие экспериментальным данным из литературных источников [6].

Представленный подход позволяет учесть влияние на время прохождения дистанции множества факторов, таких как плотность, вязкость и температура среды, масса биомеханической системы, скорость и

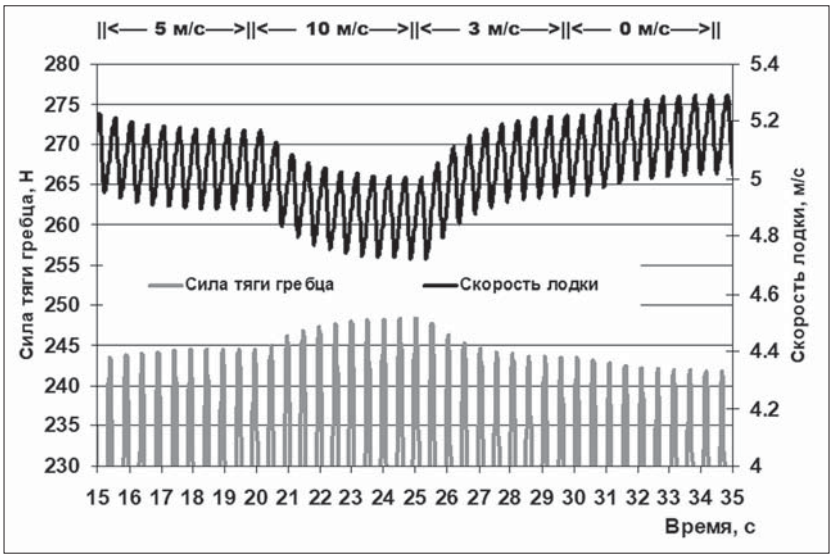


Рисунок 3 – Изменение скорости лодки и силы тяги гребца под влиянием переменной скорости встречного ветра (результат моделирования)
Figure 3 – The change of kayak speed and pull force of the rower under the influence of variable headwind speed (modeling result)

направление ветра, скорость и направление течения, ритм гребли, глубина водоема, гидродинамические свойства лодки и прочее.

Наилучшим образом данный подход пригоден для анализа перемещения в воде всего тела: плавания, ныряния, гребли, выпрыгивания. Вместе с тем с небольшими доработками может быть использован для моделирования передвижения в среде отдельных звеньев тела.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перенос двигательных действий из воздушной среды в водную, и наоборот, требует понимания того, какие внешние силы действуют и как они сказываются на структуре движения. Выполнение движений в воде сопряжено с действием большего количества сил, что увеличивает координационную сложность, а также усложняет биомеханический анализ.

Наиболее оперативен качественный аналитический подход, основанный на сопоставлении направлений движения и векторов действия сил. Такой подход позволяет получить принципиальный ответ, способствуют или препятствуют гидродинамические силы выполнению двигательного действия.

Количественный подход на основе суммирования моментов сил в системе рычагов двигательного аппарата позволяет численно анализировать статические или медленные движения, определяя нагрузку на сжатие и скручивание в конкретных суставах.

Количественный подход на основе CFD-моделирования позволяет непосредственно увидеть процесс обтекания неподвижного движителя средой и точно определить действующие гидродинамические силы. Однако подход не учитывает влияние самих сил на движитель, а также не позволяет смоделировать сложные траектории движения.

Количественный подход на основе рекуррентного физико-математического моделирования является наиболее универсальным, позволяющим дополнять алгоритм необходимыми переменными и коэффициентами.

Все представленные количественные подходы строятся на моделировании, поэтому выполняются с использованием компьютерных технологий.

Очевидно, что полноценный анализ влияния среды на выполнение двигательного действия требует применения всех четырех представленных подходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адашевский, В. М. Физико-математическое моделирование для определения основных биомеханических характеристик в плавании / В. М. Адашевский, Д. А. Бородавченко // Педагогика, психология и медико-биологические проблемы физического воспитания и спорта. – 2007. – № 8. – С. 3-5.
2. Померанцев, А. А. Исследования по спортивной биомеханике с применением оптико-электронных методов регистрации параметров движения / А. А. Померанцев. – Липецк : Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского, 2018. – 233 с. – ISBN 978-5-88526-920-9.
3. Померанцев, А. А. Компьютерное моделирование взаимодействия биомеханической гребной системы (БГС) со средой / А. А. Померанцев // На рубеже XXI века. Год 2004-й: Научный альманах МГАФК / Московская государственная академия физической культуры. – Малаховка : Московская государственная академия физической культуры, 2004. – С. 360-367.
4. Померанцев, А. А. Методика пространственной реконструкции подводной траектории движения весла как основа теоретических и прикладных исследований в гребном спорте / А. А. Померанцев. – Липецк : Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского, 2012. – 184 с. – ISBN 978-5-88526-586-7.
5. A Review in Biomechanics Modeling / A.M. Let, V. Filip, D. Let, S. Mihai // Proceedings of the International Conference of Mechatronics and CyberMixMechatronics, 2020. DOI:10.1007/978-3-030-53973-3_17.
6. Analysis of a normal and aero helmet on an elite cyclist in the dropped position / P. Forte, D.A. Marinho, T.M. Barbosa, J.E. Morais // AIMS Biophysics. – March 2020. – 7(1). – С. 54-64. DOI: 10.3934/biophy.2020005.
7. Analysis of cyclist's drag on the aero position using numerical simulations and analytical procedures: a case study / P. Forte, D.A. Marinho, P.T. Nikolaidis, B. Knechtle, T.M. Barbosa, J.E. Morais // International Journal of Environmental Research and Public Health. – May 2020. – 17(10). – 3430. DOI: 10.3390/ijerph17103430.
8. Dynamic simulation of flat water kayaking using a coupled biomechanical-smoothed particle hydrodynamics model / S.M. Harrison, P.W. Cleary, R.C.Z. Cohen // Human Movement Science. – 2019. – Vol. 64. – С. 252-273. DOI:10.1016/j.humov.2019.02.003.
9. Jiang, L., Research on 3D simulation of swimming technique training based on FPGA and virtual reality technology / L. Jiang // Microprocessors and Microsystems. – 2021. – Vol. 81. – 103657 DOI: 10.1016/j.micpro.2020.103657.
10. Karmanov, S. P. Modeling of breaststroke swimming / S. P. Karmanov, F. L. Chernous'ko // Doklady Physics. – 2014. – Vol. 59. – No 2. – С. 103-106. DOI: 10.1134/S1028335814020104.
11. Lighthill, J. Mathematical Biofluiddynamics / J. Lighthill. – Philadelphia: SIAM, 1975. – 281 с.
12. Linthorne, N.P. The effect of wind on 100 m sprint times / N.P. Linthorne // Journal of Applied Biomechanics. – 1993. – 10 (2). – С. 110-131. DOI: 10.1123/jab.10.2.110.
13. Mureika, J.R. A realistic quasi-physical model of the 100 m dash / J.R. Mureika // Canadian Journal of Physics. – 2001. – 79(4). – С. 697-713. DOI: 10.1139/p01-031.
14. Numerical investigation of the impact of Kenenisa Bekele's cooperative drafting strategy on its running power during the 2019 Berlin marathon / G. Polidori, F. Legrand, F. Bogard, F. Madaci, F. Beaumont // Journal of Biomechanics. – 2020. – Vol. 107. – 109854, DOI: 10.1016/j.jbiomech.2020.109854.
15. Numerical simulations of a swimmer's head and cap wearing different types of goggles / D.A. Marinho, D. Willemsen, T.M. Barbosa, A.J. Silva, J.P. Vilas-Boas, H.P. Neiva, P. Forte // Sports Biomechanics. – 2021. DOI: 10.1080/14763141.2021.1923793.
16. Quinn, M. The effects of wind and altitude in the 400-m sprint / M. Quinn // Journal of Sports Sciences. – 2004. – 22:11-12. – С. 1073-1081. DOI:10.1080/02640410410001730016.

REFERENCES

1. Adashevskij, V.M, Borodavchenko D.A.. [Physical and mathematical modeling for determining the main biomechanical characteristics in swimming]. Pedagogy, psychology and biomedical problems of physical education and sports, 2007, № 8, pp. 3-5 (In Russ.).
2. Pomerantsev, A.A. Issledovaniya po sportivnoj biomekhanike s primeneniem optiko-elektronnyh metodov registracii parametrov dvizheniya [Research on sports biomechanics using optoelectronic methods for recording motion parameters]. Lipetsk, LGPU, 2018. – 233 p. (In Russ.).
3. Pomerantsev, A.A. Komp'yuternoe modelirovanie vzaimodejstviya biomekhanicheskoj grebnoj sistemy (BGS) so sredoj [Computer simulation of the interaction of a biomechanical kayaking system (BKS) with the environment]. At the turn of the XXI century. Year 2004: Scientific Almanac of MSAPC / Moscow State Academy of Physical Culture. - Malakhovka: Moscow State Academy of Physical Culture, 2004. – pp. 360-367. (In Russ.).
4. Pomerantsev, A.A. Metodika prostranstvennoj rekonstrukcii podvodnoj traektorii dvizheniya vesla kak osnova teoreticheskih i prikladnyh issledovanij v grebnom sporte [The methodology of spatial reconstruction of the underwater trajectory of the paddle movement as the basis of theoretical and applied research in rowing]. Lipetsk, LGPU, 2012. – 184 p.
5. Let A.M., Filip V., Let D., Mihai S. A Review in Biomechanics Modeling. Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber- MixMechatronics, 2020. DOI:10.1007/978-3-030-53973-3_17
6. Forte P., Marinho D.A., Barbosa T.M., Morais J.E. Analysis of a normal and aero helmet on an elite cyclist in the dropped position AIMS Biophysics,

March 2020. 7(1), pp. 54-64. DOI: 10.3934/biophy.2020005
7. Forte P., Marinho D.A., Nikolaidis P.T., Knechtle B., Barbosa T.M., Morais J.E. Analysis of cyclist's drag on the aero position using numerical simulations and analytical procedures: a case study. International Journal of Environmental Research and Public Health, May 2020. 17(10), 3430. DOI: 10.3390/ijerph17103430
8. Harrison S.M., Cleary P.W., Cohen R.C.Z. Dynamic simulation of flat water kayaking using a coupled biomechanical-smoothed particle hydrodynamics model. Human Movement Science, 2019, Vol. 64, pp. 252-273. DOI:10.1016/j.humov.2019.02.003
9. Jiang, L., Research on 3D simulation of swimming technique training based on FPGA and virtual reality technology. Microprocessors and Microsystems, 2021, Vol. 81, 103657 DOI: 10.1016/j.micpro.2020.103657
10. Karmanov S. P., Chernous'ko F. L. Modeling of breaststroke swimming. Doklady Physics, 2014, Vol. 59(2), pp. 103-106. DOI: 10.1134/S1028335814020104
11. Lighthill, J. Mathematical Biofluiddynamics. Philadelphia, SIAM, – 1975. – 281 p.
12. Linthorne, N.P. The effect of wind on 100 m sprint times. Journal of Applied Biomechanics, 1993, 10 (2), pp. 110-131. DOI: 10.1123/jab.10.2.110
13. Mureika, J.R. A realistic quasi-physical model of the 100 m dash. Canadian Journal of Physics, 2001, 79(4), pp. 697-713. DOI: 10.1139/p01-031
14. Polidori G., Legrand F., Bogard F., Madaci F. Beaumont Numerical investigation of the impact of Kenenisa Bekele's cooperative drafting strategy on its running power during the 2019 Berlin marathon. Journal of Biomechanics, 2020, Vol. 107, 109854. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2020.109854
15. Marinho D.A., Willemsen D., Barbosa T.M., Silva A.J., Vilas-Boas J.P., Neiva H.P., Forte P. Numerical simulations of a swimmer's head and cap wearing different types of goggles. Sports Biomechanics, 2021. DOI: 10.1080/14763141.2021.1923793
16. Quinn, M. The effects of wind and altitude in the 400-m sprint. Journal of Sports Sciences, 2004, 22:11-12, pp. 1073-1081. DOI:10.1080/02640410410001730016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:
Померанцев Андрей Александрович (Pomerantsev Andrey Aleksandrovich) – кандидат педагогических наук, доцент; Липецкий государственный педагогический университет имени П.П. Семенова-Тян-Шанского; 398020, г. Липецк, ул. Ленина, д. 42; e-mail: a.pomerantsev1981@gmail.com; ORCID: 0000-0003-4197-2183
Яковлева Полина Игоревна (Yakovleva Polina Igorevna) – магистрант; Липецкий государственный педагогический университет имени П.П. Семенова-Тян-Шанского; 398020, г. Липецк, ул. Ленина, д. 42; e-mail: yeahyeah11@mail.ru; ORCID: 0000-0002-1718-6011.
Высоцкая Екатерина Анатольевна (Vysotskaya Ekaterina Anatol'evna) – кандидат биологических наук; Липецкий государственный технический университет; 398055, г. Липецк, ул. Московская, д. 30, корпус Б; e-mail: k.chesnokova@mail.ru; ORCID: 0000-0001-5428-7156.

Поступила в редакцию 14 января 2022 г.
Принята к публикации 15 февраля 2022 г.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ
Померанцев, А.А. Биомеханический анализ влияния среды на выполнение двигательных действий: обзор концептуальных подходов / А.А. Померанцев, П.И. Яковлева, Е.А. Высоцкая // Наука и спорт: современные тенденции. – 2022. – Т. 10, № 1. – С. 70-78. DOI:10.36028/2308-8826-2022-10-1-70-78

FOR CITATION
Pomerantsev A. A., Yakovleva P. I., Vysotskaya E. A. Biomechanical analysis of the environment influence on motor actions: conceptual approaches review. Science and sport: current trends, 2022, vol. 10, no. 1, pp. 70-78 (in Russ.) DOI:10.36028/2308-8826-2022-10-1-70-78