

DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2020.3.03

УДК 797.122.3.081 / 621.317.39

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ В ОЦЕНКЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СПОРТИВНЫХ ДВИЖЕНИЙ**

**В.Е. Васюк<sup>1</sup>, Д.И. Гусейнов<sup>1</sup>, Н.С. Давыдова<sup>2</sup>, Д.А. Лукашевич<sup>1</sup>, А.В. Минченя<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь, 220013, Минск, пр-т Независимости, 65, e-mail: vassiouk@bntu.by

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет информационных технологий, Республика Беларусь, 220013, Минск, ул. Петруся Бровки, 6, e-mail: davydova-ns@bsuir.by

<sup>3</sup> ООО «Интегрированные устройства», Республика Беларусь, 220089, Минск, ул. Кульман, 9, e-mail: alex\_minch@mail.ru

**Аннотация.** Описаны конструктивные и программные особенности интеллектуального датчика, монтируемого на древко весла для регистрации динамических параметров, характеризующих взаимодействие спортсмена с веслом и поверхностью воды в опорной (водной) части гребка. В результате исследования получены экспериментальные данные, разработан алгоритм анализа кривой тензодинамограммы и расчета составляющих результирующего усилия, прикладываемого к веслу в процессе гребли. На основании обзора литературы по проблематике исследования, а также полученных в ходе пилотного эксперимента данных доказана перспективность использования интеллектуальных сенсорных систем в качестве средств количественного описания выполнения спортивных движений в естественных условиях. Представленный математический алгоритм расчета величин отдельных составляющих результирующего усилия позволяет оценить соотношение прикладываемых спортсменом усилий и возникающей в результате этого на лопасти весла нагрузки. Полученные результаты позволяют сделать заключение о перспективности использования метода мобильной беспроводной тензометрии для оценки биомеханических параметров спортивных движений. Определены пути дальнейшего совершенствования разработанной методики.

**Ключевые слова:** гребля на каноэ, техника гребли, интеллектуальные сенсорные системы, беспроводная тензометрия.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Основным индикатором профессионализма высококвалифицированных спортсменов является достижение определенного результата при осуществлении соревновательной деятельности [12]. Высокого спортивного результата в современном спорте невозможно достичь без совершенствования алгоритмов управления процессом подготовки спортсменов, основанных на использовании инновационных технических средств для количественной оценки и контроля техники выполнения соревновательных упражнений [6]. Такой подход позволяет определить основные факторы, влияющие

---

© Васюк В.Е., Гусейнов Д.И., Давыдова Н.С., Лукашевич Д.А., Минченя А.В., 2020

Васюк Валерий Евстафьевич, к.п.н., доцент, заведующий кафедрой спортивной инженерии, Минск

Гусейнов Даниил Истамович, инженер кафедры спортивной инженерии, Минск

Давыдова Надежда Сергеевна, к.т.н., доцент кафедры инфокоммуникационных технологий, Минск

Лукашевич Дмитрий Анатольевич, аспирант кафедры спортивной инженерии, Минск

Минченя Александр Владимирович, директор ООО «Интегрированные устройства», Минск

на эффективность выполнения упражнений, выявить характерные особенности взаимодействия отдельных элементов двигательных действий, а также отслеживать динамику подготовленности спортсмена в доступных для понимания тренеру и спортсмену величинах [17].

Безуключенная гребля относится к видам спорта, в которых результативность соревновательной деятельности в равной степени обусловлена уровнем физических кондиций и технического мастерства спортсмена. Сложность количественного описания техники гребли в условиях естественной управляющей среды обусловлена тем, что гребная локомоция осуществляется одновременно в воздушной и водной средах [10]. Подобное обстоятельство предъявляет дополнительные требования к защищенности контрольно-измерительных систем и устройств, что сказывается на их габаритных размерах и качестве регистрируемых данных. Вследствие этого основными и широко распространенными инструментальными средствами контроля уровня технической подготовленности спортсменов-гребцов являются: секундомер, высокоскоростная видеокамера, специализированное программное обеспечение видеонализа движений, а также различные инерционные измерительные системы, основанные на технологии *GPS* и, как правило, состоящие из набора стандартных модулей (акселерометр, магнитометр, гироскоп) [22]. Данные, получаемые посредством подобных устройств и систем, описывают исключительно кинематическую структуру гребных локоций и носят следственный характер, что не позволяет судить о факторах, обеспечивающих текущую производительность спортсменов-гребцов. При этом процесс проведения тестирования и обработки полученных результатов достаточно трудоемок, а точность и достоверность полученных данных в значительной степени зависит от квалификации персонала. В случае использования инерционных датчиков – от конструктивных и схемотехнических особенностей, а также сложности программных алгоритмов регистрации [19]. Кроме того, стоит отметить, что неоднократно предпринимались попытки моделирования техники гребли с целью выявления основополагающих факторов, обеспечивающих эффективность и результативность гребли в естественных условиях, а также описания их взаимодействия [18, 26, 28, 32]. Однако подобные эксперименты трудоемки, требуют использования крупногабаритных высокопроизводительных электронно-вычислительных систем, а получаемые результаты могут не соответствовать действительности вследствие воздействия на систему «спортсмен – весло – лодка» большого количества факторов, существенно влияющих на итоговый результат.

Одним из факторов, непосредственно влияющих на спортивный результат в гребле, является взаимодействие весла спортсмена с поверхностью воды: усилие, прикладываемое к веслу; скорость нарастания усилия; распределение развиваемого усилия во времени; выполняемая спортсменом работа; затрачиваемая спортсменом энергия и т. д. Взаимодействие спортсмена с веслом в цикле гребных локоций сопровождается деформацией инвентаря, а величина деформации, как правило, пропорциональна величине прикладываемого усилия. Вследствие этого одним из наиболее объективных методов количественной оценки и контроля эффективности гребка, позволяющим получить точные и достоверные данные, является тензометрия. При этом отметим, что метод тензометрии в области спорта, и в гребле на каноэ в частности, неоднократно применялся с целью определения динамических параметров, характеризующих выполнение соревновательного упражнения, а также отдельных его элементов [1, 3, 14, 29, 30, 31, 33]. Однако системы, используемые в такого рода исследованиях, достаточно громоздки, анализ массива полученных данных трудоемок и требует значительных временных затрат, что не позволяет внедрять подобные средства в практику подготовки спортсменов.

В современном спорте необходимо использовать компактные беспроводные датчики на базе микрокомпьютеров и аналого-цифровых преобразователей, не влияющие (либо влияющие незначительно) на эргономические свойства снарядов и инвентаря, а также позволяющие регистрировать данные в условиях, приближенных к соревновательным [25]. Наиболее перспективным направлением в спорте для решения обозначенных задач, на наш взгляд, является метод тензометрии, схемотехнически реализуемый на базе интеллектуальных сенсорных систем (*sensor* – с англ. «датчик»), основанных на технологиях *MEMS*, что позволяет добиться минимизации габаритных размеров и массы конструкции, а также обеспечить беспроводную высокочастотную регистрацию и передачу данных [7, 20, 23]. Как правило, в состав интеллектуальных датчиков входит чувствительный элемент, аналого-цифровая схема, аналого-цифровой преобразователь, микропроцессор (выполнение арифметических и логических функций, управление данными и т.д.), а также различные шины передачи данных между компонентами системы. Подобная структура обеспечивает не только регистрацию и преобразование относительных величин механического воздействия на чувствительный элемент в электрический сигнал, но и его первичную обработку и конвертацию в цифровой и графический вид в режиме реального времени. А благодаря достаточно высокой частоте регистрации измеряемых параметров ( $\leq 200$  Гц) возможно до мельчайших подробностей анализировать получаемые данные [9].

В видах спорта, в которых тренировочные задания осуществляются в условиях сбивающих (климатических) факторов внешней среды, использование подобных измерительных систем позволяет получать наиболее объективные данные, характеризующие эффективность движений, вследствие чего они приобретают большую практическую и научную значимость.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование с использованием экспериментальных интеллектуальных датчиков проводилось на базе учреждения «Городской центр олимпийского резерва по гребным видам спорта главного управления спорта и туризма Мингорисполкома», в котором приняли участие два квалифицированных спортсмена 17–18 лет, специализирующиеся в гребле на каноэ, имеющие опыт выступлений на международных соревнованиях. Суть тестового задания заключалась в прохождении отрезка дистанции с темпом гребли 65–70 гр/мин в течение 30 с. Для контроля темпа гребли использовались смарт-часы.

Оценка биомеханических параметров гребли на каноэ, характеризующих взаимодействие спортсмена с веслом в опорной (водной) части гребка, осуществлялась посредством разработанных в лаборатории спортивной биомеханики Белорусского национального технического университета интеллектуальных датчиков, позволяющих регистрировать упругие деформации индивидуального инвентаря с передачей информации по каналу беспроводной передачи данных *Bluetooth* на устройство-приемник (мобильный телефон или компьютер). Конструктивно датчик представляет собой секционное устройство, монтируемое посредством крепежных хомутов на древко весла (рис. 1).

Чувствительный элемент, представленный тензорезистором, наклеен на упругую тонкую металлическую пластину и располагается в нижней секции, прилегающей непосредственно к древку весла. В нижней секции предусмотрены канавки для крепежных хомутов. Микросхемы, органы управления датчиком и индикаторы, сигнализирующие о том, что датчик включен, а также о переходе в режим калибровки, расположены в верхней секции. Режим калибровки, предустановленный в программном обеспечении датчика, активируется нажатием соответствующей кнопки. Повторным нажатием кнопки при действии нагрузочного веса производится калибровка весла.

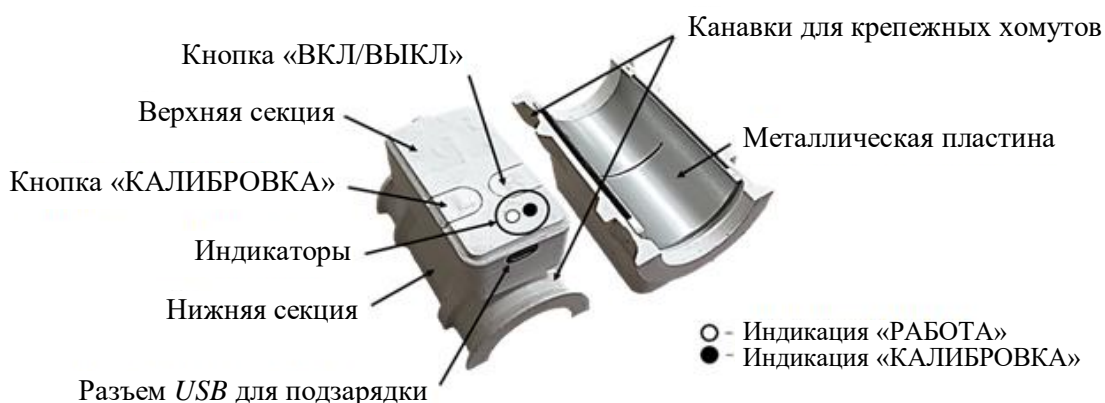


Рис. 1. Интеллектуальный тензометрический датчик на весле

Параметры калибровки сохраняются при выключении датчика, однако обнуляются при полной его разрядке. Сброс данных калибровки осуществляется посредством нажатия кнопки калибровки при условии наличия в оперативной памяти устройства калибровочных данных.

Режим калибровки, предустановленный в программном обеспечении датчика, активируется нажатием соответствующей кнопки. Повторным нажатием кнопки при действии нагрузочного веса производится калибровка весла. Параметры калибровки сохраняются при выключении датчика, однако обнуляются при полной его разрядке. Сброс данных калибровки осуществляется посредством нажатия кнопки калибровки при условии наличия в оперативной памяти устройства калибровочных данных.

Непосредственно калибровка осуществляется следующим образом. Весло закрепляется в горизонтальном положении на двух опорах, расположение которых соответствует хвату спортсмена: одна опора располагается под рукояткой, вторая – в центре области хвата тянущей руки гребца. Опора, находящаяся в области тянущей руки, представляет собой цилиндр, радиус поперечного сечения которого не должен превышать радиус древка весла, что необходимо для создания точечного взаимодействия в условиях двухточечной деформации. На лопасть весла устанавливается калибровочный вес с целью создания деформации, характер и направление которой соответствует выполнению опорной части гребка в естественных условиях гребли. Важным условием является распределение калибровочного веса по лопасти, что будет соответствовать естественному приложению нагрузки (рис. 2).

Применяемый в исследовании интеллектуальный датчик регистрирует условные единицы деформации инвентаря, вызванные совокупным воздействием внешних сил, учет которых необходим для корректной калибровки. В процессе калибровки весло

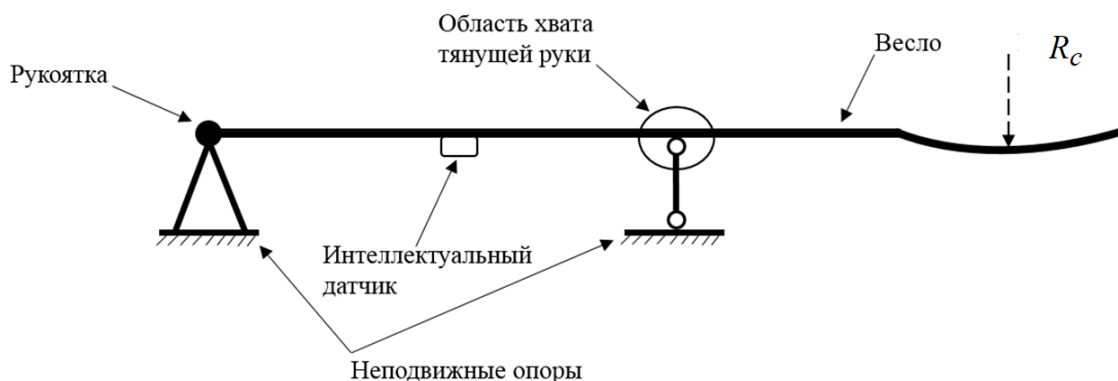


Рис. 2. Схема калибровки весла

представляет собой неразрезную многопролетную балку, деформация которой обусловлена не только воздействием на лопасть калибровочного веса, но и силами реакции со стороны опор, на которых оно расположено (рис. 3).

Подобное расположение опоры в точке  $A$  обусловлено закреплением рукоятки весла сверху таким образом, что количество степеней его свободы сокращается до одной (вращение вокруг оси, проходящей через рукоятку весла и перпендикулярной ее поперечному сечению). Определение достоверной величины прикладываемого к веслу результирующего усилия, вызывающего текущую деформацию древка весла, возможно посредством использования метода уравнений трех моментов [2]:

$$M_A = R_B l_1 - Q l_2 = 0, \quad (1)$$

где  $M_A$  – результирующий момент, действующий в точке  $A$ , Н·м;  $R_B$  – реакция опоры в центре области тянущей руки спортсмена (точка  $B$ ), Н;  $l_1$  – расстояние от центра поперечного сечения рукоятки весла до центра области тянущей руки спортсмена, м;  $l_2$  – расстояние от центра поперечного сечения рукоятки весла до геометрического центра лопасти (точка приложения результирующего вектора нагрузки  $Q$ ), м;  $Q$  – калибровочная нагрузка, Н.

$$M_B = R_A l_1 - Q(l_2 - l_1) = 0, \quad (2)$$

где  $M_B$  – результирующий момент, действующий в точке  $B$ , Н·м;  $R_A$  – реакция опоры в центре поперечного сечения рукоятки весла (точка  $A$ ), Н.

$$R_B = \frac{Q l_2}{l_1}, \quad (3)$$

$$R_A = \frac{Q(l_2 - l_1)}{l_1}, \quad (4)$$

$$F_\Sigma = R_A + R_B - Q, \quad (5)$$

где  $F_\Sigma$  – результирующее усилие, воздействующее на весло в процессе калибровки, Н.

Жесткость весел различных производителей под действием одинаковой нагрузки влияет на величину деформации. Однако жесткость древка весла, как правило, однородна и равномерно распределена по всей его длине, что позволяет ее пренебречь. Таким образом, после математических преобразований системы из двух уравнений суммарных моментов внешних сил, действующих в точках  $A$  и  $B$  в процессе калибровки, величина результирующего усилия, регистрируемого датчиком на основании текущей деформации древка весла, зависит от калибровочной нагрузки, а также от ее расположения относительно опор.

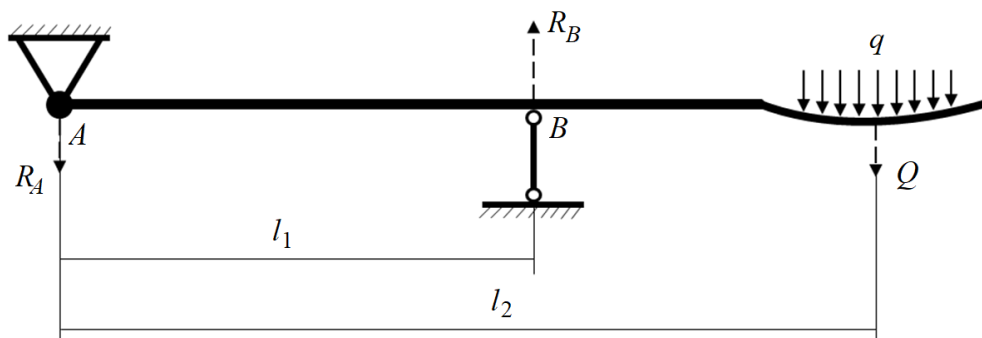


Рис. 3. Схема калибровки весла с точки зрения теоретической механики

Алгоритм калибровочного режима содержит усредненные значения длины весла и расстояния от центра области хвата тянущей руки спортсмена до точки приложения результирующего вектора нагрузки на лопасти. Как показывает практика, область хвата тянущей руки спортсмена смещается пропорционально увеличению длины весла, которая может изменяться в пределах 10%, что не оказывает существенного влияния на регистрируемые данные.

Программная часть системы представлена двумя специализированными приложениями для мобильных устройств на базе операционной системы *Android* (рис. 4).



Рис. 4. Интерфейсы приложений *IntGear recorder* и *IntGear devices*

Приложение *IntGear recorder* предназначено для записи данных о деформации инвентаря при выполнении упражнений, а мобильное устройство с активированным приложением выступает исключительно в роли приемника информации. Рассматриваемое приложение позволяет регистрировать данные одновременно с 4 устройств.

Приложение *IntGear devices* предназначено для отображения регистрируемых данных с активных датчиков, а также кривых, характеризующих текущую деформацию чувствительного элемента датчика. В области отображения кривой предусмотрен алгоритм автоматического масштабирования, что позволяет использовать мобильное устройство в качестве средства биологической обратной связи и оперативно корректировать технику выполнения упражнения относительно отображаемых данных. Единовременно может отображаться кривая, характеризующая деформацию чувствительного элемента одного из активных датчиков, однако имеется возможность быстрого переключения между ними, что позволяет анализировать соответствующие кривые, не прерывая выполнение упражнения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Использование интеллектуального датчика в гребле на каноэ позволяет получить как количественные данные, так и графический материал, представленный тензодинамограммой, которая демонстрирует зависимость суммарной нагрузки, прикладываемой к веслу, от времени и отражает выполнение спортсменом как опорной, так и безопорной части гребка. В опорной части гребка деформация древка весла

обеспечивается за счет активного взаимодействия спортсмена с веслом и поверхностью воды в цикле гребных локомоций, а также инерционными силами, возникающими в ответ на резкое изменение пространственного положения весла. Часть кривой зависимости, находящейся в области положительных значений, соответствует опорной части гребка, а часть кривой, находящейся в области отрицательных значений, соответствует безопорной части гребка. Однако точное определение фаз гребка требует наличия в датчике встроенной системы видеосинхронизации со скоростной камерой, что предполагается сделать на последующих стадиях разрабатываемой методики. Общие закономерности поведения кривой при выполнении гребка представлены на рис. 5.

В частности, участок кривой, ограниченный отрезком «а–б», соответствует фазе зацепа и началу опорной части гребка, которая характеризуется резким повышением величин прикладываемой к веслу нагрузки. Участок кривой, ограниченный отрезком «б–в», соответствует фазам подтягивания и отталкивания от поверхности воды и характерен изменением величин нагрузки в пределах 30–40% от максимального значения за гребок. На участке кривой, ограниченном отрезком «в–г», происходит существенное снижение прикладываемой нагрузки, что соответствует извлечению лопасти весла из воды.

Однако на практике форма кривой, описывающей характер гребных локомоций, зависит от особенностей технической и физической подготовленности гребца (рис. 6).

Спортсмен 1, имеющий более высокий уровень подготовленности, акцентированно выполняет фазы зацепа и отталкивания от поверхности воды, что отражается соответствующими пиками в начале и конце опорной части гребка. Однако часть нагрузки теряется в середине опорной части при выполнении фазы подтягивания. Это в значительной степени влияет на эффективность гребка, поскольку в данной фазе создается наибольшее пропульсивное воздействие, способствующее ускоренному продвижению лодки. Спортсмен 2 с менее высоким уровнем подготовленности акцентированно выполняет начало опорной части гребка, фазу зацепа. При этом четко прослеживается импульсный характер развития усилий в рассматриваемой фазе, что при отсутствии соответствующей физической подготовленности негативно сказывается на равномерности хода лодки. Это объясняется тем, что, несмотря на кратковременное существенное ускорение движения лодки, средняя скорость продвижения по дистанции ниже, что связано с невозможностью поддержания спортсменом усилия в середине и конце опорной части гребка при текущей скорости водного потока, вызванного ударным взаимодействием. Поддержание равномерной и высокой скорости движения лодки при подобной стратегии гребли требует от спортсмена проявления значительного силового обеспечения с увеличением темпа выполняемого упражнения.

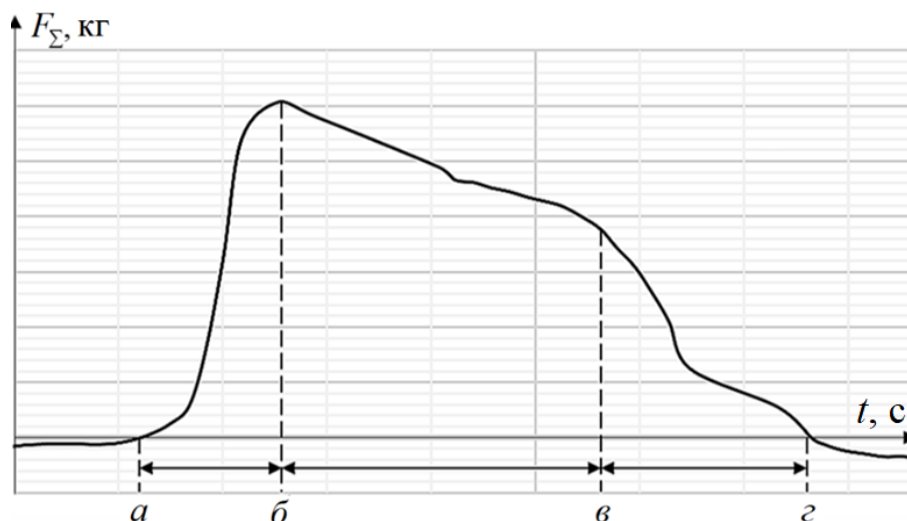


Рис. 5. Участки кривой тензодинамограммы при выполнении гребка





Рис. 6. Тензодинамограммы выполнения гребка спортсменами: 1 – спортсмен с более высоким уровнем подготовленности; 2 – спортсмен с менее высоким уровнем подготовленности

Согласно результатам исследования достоверность регистрируемых данных можно обосновать природой возникновения деформации твердых тел, в соответствие с которой ее величина при прочих равных условиях (геометрические размеры, форма, плотность и жесткость материала и т.д.) прямо пропорциональна величинам прикладываемых усилий. Значения на тензодинамограмме будут максимальными в случае, когда результирующие векторы внешних сил, воздействующих на весло, находятся в плоскости деформации и перпендикулярны ему. Отклонения векторов от нормали или плоскости деформации вызовет уменьшение величины результирующего усилия, прикладываемого к веслу, что будет соответствовать изменению кривой зависимости на диаграмме.

На основании регистрируемых датчиком интегральных показателей силового воздействия на весло, в зависимости от целей и задач исследования, возможен расчет следующих наиболее информативных биомеханических параметров гребли: мощность гребных локомоций, количество выполненной работы, длительность гребного цикла, а также отдельных его частей и т.д. Также с помощью методов математической статистики возможно выявить и оценить стереотипность и стабильность выполнения упражнения путем расчета коэффициентов вариативности и стабильности.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования в спортивной сфере направлены, как правило, на анализ и оценку подготовленности спортсменов с целью совершенствования процесса их дальнейшей подготовки [13, 16]. При этом грамотно скорректировать тренировочный процесс, основываясь лишь на некоторых составляющих, характеризующих тренированность спортсменов, не представляется возможным. Поэтому современная система спортивной тренировки основывается на использовании эффективных средств и методов комплексного контроля подготовленности спортсменов в различных условиях выполнения основного соревновательного упражнения. Однако подобная



положительная тенденция не в полной мере затрагивает гребной спорт. Это обусловлено особенностью гребли, которая заключается в осуществлении тренировочной и соревновательной деятельности на стыке воздушной и водной сред, что в значительной степени затрудняет сбор экспериментальных данных. Основными контролируемыми параметрами в гребле на байдарках и каноэ, влияющими на структуру тренировочного процесса, являются физиологические и кинематические параметры [5, 15].

На сегодняшний день насчитывается большое количество различных датчиков и трекеров для регистрации кинематических параметров движения системы «спортсмен – весло – лодка». Основными производителями подобных устройств являются *POLARITÁS* (Венгрия), *Nielsen-Kellerman* (США), *Catapult Innovations* (Австралия) и МАИ (Россия). Регистрируемые такими гаджетами показатели обладают существенной погрешностью в силу лежащей в основе их функционирования технологии [11]. При этом в гребле на каноэ одним из важнейших компонентов техники, определяющим эффективность прохождения соревновательной дистанции в условиях конкурентной борьбы, является передача усилий с лопасти весла на опору лодки.

Величина конечного усилия, действующего на систему «спортсмен – весло – лодка», много меньше исходного. Это прежде всего связано с поглощением развиваемого усилия в амортизирующих узлах, что вызывает взаимное перемещение недостаточно жестко связанных сегментов [4]. Данное обстоятельство наталкивает на необходимость совокупной регистрации усилий, прикладываемых на лопасть весла, а также усилий, прикладываемых опорной и направляющей ногами гребца к опоре лодки, что позволит определить эффективность гребли посредством коэффициента полезного действия (КПД):

$$\text{КПД} = \frac{F_2}{F_1} 100 \%, \quad (6)$$

где  $F_1$  – величина результирующего усилия, развиваемого на лопасти весла, Н;  $F_2$  – величина результирующего усилия, прикладываемого к опоре лодки в направлении ее движения, Н.

Стремление рассматриваемого показателя к 100% будет являться индикатором эффективности передачи развиваемого усилия на лопасти весла в системе «спортсмен – весло – лодка» в целом.

Однако устройства и системы непосредственной регистрации динамических параметров безуклюженной гребли на сегодняшний день отсутствуют. Следует отметить известные попытки расчета и анализа динамических параметров гребли на основании массива кинематических данных [27]. Однако подобные способы не обладают достаточным практическим потенциалом, поскольку расчеты, как правило, трудоемки, а получаемые данные обладают высокой погрешностью.

Существует несколько систем комплексной регистрации широкого спектра биомеханических параметров уключенной гребли в естественных условиях [24]. Успешность внедрения и применения таких систем можно объяснить креплением весла посредством уключины, что обеспечивает фиксированный диапазон движения весла в пространстве. Кроме того, посредством вращения уключины возможно с достаточной степенью точности определить многие кинематические и динамические параметры гребли.

В связи с этим особую актуальность имеет разработка и внедрение в тренировочной процесс спортсменов, специализирующихся в безуклюженной гребле (каноэ и байдарка), портативных технических средств регистрации динамических параметров, характеризующих взаимодействие весла с поверхностью воды. При этом синхронная регистрация кинематических параметров суставных движений гребца,

а также движения системы «спортсмен – весло – лодка» позволит выявить определенные закономерности взаимодействия регистрируемых параметров [21]. В частности, влияние перемещения спортсмена в пространстве, а также относительного перемещения и ориентации его звеньев в цикле гребных локомоций на кинематические характеристики движения лодки и динамические характеристики взаимодействия спортсмена с лодкой и весла с поверхностью воды. Особенно важным в гребле на байдарках и каноэ является совпадение моментов максимального приложения усилия к веслу и максимального отклонения продольной оси лодки от плоскости, образованной поверхностью воды, поскольку в течение подобного промежутка времени система «спортсмен – весло – лодка» приобретает наибольшее пропульсивное воздействие, способствующее ускорению лодки на дистанции. Это связано прежде всего с уменьшением величины площади лодки, соприкасающейся с поверхностью воды, вследствие чего уменьшается величина силы сопротивления окружающей среды, препятствующая ускоренному продвижению системы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описаны конструктивные и программные особенности интеллектуального датчика для гребли на каноэ, основанного на технологии беспроводной тензометрии. Согласно разработанным алгоритмам анализа результирующей кривой тензодинамограммы в динамике выполнения упражнений и математического расчета составляющих суммарного усилия, прикладываемого к веслу в процессе гребли, возможно оценить уровень скоростно-силовой и технической подготовленности спортсменов. Получаемые данные уже сейчас позволяют качественно оценивать технику гребли в режиме реального времени, а регистрируемые цифровые показатели количественно характеризуют качество гребка. Применение подобных датчиков может быть востребованным и при подборе индивидуальных весел различных производителей, а также в качестве средств биологической обратной связи при выполнении специальных упражнений, способствующих коррекции техники движений спортсменов в естественных условиях выполнения гребных локомоций [8].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анциперов В.В. Технология тензометрического измерения в спорте: монография / Волгогр. гос. акад. физ. культ. – Волгоград, 2013. – 129 с.
2. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1965. – 856 с.
3. Варошкин Г. Изследване стойността на допълнителния импулс на силата при скислалом // Въпроси на физическата култура. – 1979. – № 5. – С. 230–235.
4. Иссурин В.Б., Силаев А.П., Саносян Х.А., Смирницкий К.И. Особенности согласования движений при гребле на каноэ // Греб. спорт: Ежегодник. – М., 1982. – С. 22–24.
5. Квашук П.В., Верлин С.В., Семаева Г.Н. Критерии оценки функционального состояния гребцов на байдарках высокой квалификации // Вестник спортивной науки. – 2008. – № 4. – С. 20–26.
6. Козина Ж.Л., Прусик К., Прусик Е. Концепция индивидуального подхода в спорте // Педагогіка, психологія та медико-біологічні проблеми фізичного виховання і спорту. – Харків: ХДАДМ, 2015. – № 3. – С. 28–37.
7. Кочергин В.И. Большой англо-русский толковый научно-технический словарь компьютерных информационных технологий и радиоэлектроники: в 9 т. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2016. – Т. 8. – С. 3333.
8. Лукашевич Д.А., Гусейнов Д.И. Использование интеллектуальных систем для подбора индивидуального весла в гребле на каноэ // Прикладная спортивная наука. – 2019. – № 1 (9). – С. 18–25.
9. Мейджер Дж.К.М. Интеллектуальные сенсорные системы: пер. с англ; под ред. д.т.н., проф. В.А. Шубарева. – М.: Техносфера, 2011. – С. 23–77.

10. Померанцев А.А. Биомеханический анализ водных локомоций на основе методики пространственной реконструкции гребка // Российский журнал биомеханики. – 2014. – Т. 18, № 1. – С. 73–82.
11. Потехин Д.А. Прогресс технологий регистрации кинематических параметров движения лодки в гребном спорте // Вестник спортивной науки. – 2012. – № 5. – С. 59–62.
12. Современная система спортивной подготовки / под ред. Ф.П. Сулова, В.Л. Сыча, Б.Н. Шустина. – М.: СААМ, 1995. – 448 с.
13. Теория и методика физического воспитания: учебник для ин-тов физ. культ.: в 2 т. / под общ. ред. Л.П. Матвеева, А.Д. Новикова. – 2-е изд., испр. и доп. – М., 1976. – 558 с.
14. Тихонин В.И. Методы исследования динамических характеристик в прыжках в высоту: метод. пособие / Волгогр. гос. акад. физ. культ. – Волгоград, 2004. – 32 с.
15. Харенкова О.И. Кумулятивные и текущие постнагрузочные изменения физиологических критериев функционального состояния сердечно-сосудистой системы у высококвалифицированных спортсменов (на примере гребли на байдарках и каноэ): дис. ... канд. биол. наук: 03.00.13; Кубан. гос. ун-т физ. культ., спорта и туризма. – Краснодар, 2008. – 155 с.
16. Холодов Ж.К., Кузнецов В.С. Теория и методика физического воспитания и спорта: учеб. пособие для студ. высш. учебных заведений. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Академия, 2003. – 494 с.
17. Ashley K., Ryan P., Vighdorovich O. Sensors in sports: analyzing human movement with AI // MSDN Magazine. – 2018. – Vol. 33, no. 4. – P. 28–37.
18. Caplan N. A simulation of outrigger canoe paddling performance // The Engineering of Sport 7. – 2009. – Vol. 1. – P. 97–105.
19. Fong D.T-P., Chan Y-Y. The use of wearable inertial motion sensors in human lower limb biomechanics studies: a systematic review // Sensors. – 2010. – Vol. 10, iss. 12. – P. 11556–11565.
20. Flammini A., Depari A. Advanced interfaces for resistive sensors // Smart Sensors and MEMS. – 2018. – P. 171–219.
21. Gomes B., Ramos V.N., Conceicao F., Sanders R. Paddling force profiles at different stroke rates in elite sprint kayaking // Journal of Applied Biomechanics. – 2015. – Vol. 31, iss. 4. – P. 258–263.
22. Hayden G. Croft, Daniel C. Ribeiro. Developing and applying a tri-axial accelerometer sensor for measuring real time kayak cadence // Procedia Engineering. – 2013. – No. 60. – P. 16–21.
23. Hunter G., Stetter J.R., Hesketh P., Liu C.C. Smart sensor system // Nanodevices and nanomaterials for ecological security. Eds. Y.N. Shunin, A.E. Kiv. – Basel, 2012. – P. 205–214.
24. Kleshnev V. Boat acceleration, temporal structure of the stroke cycle, and effectiveness in rowing // Journal of Sports Engineering and Technology. – 2010. – Vol. 223. – P. 63–73.
25. Mendes Jr. J.J.A., Vieira M.E.M., Pires M.B., Stevan Jr. S.L. Sensor fusion and smart sensor in sports and biomedical applications // Sensors. – 2016. – Vol. 16, iss. 10. – P. 1569–1600.
26. Morgoch D., Galipeau C., Tullis S. Sprint canoe blade hydrodynamics – modeling and on-water measurement // Procedia Engineering. – 2016. – No. 147. – P. 299–304.
27. Morgoch D., Tullis S. Force analysis of a sprint canoe blade // Journal of Sports Engineering and Technology. – 2011. – Vol. 225, iss. 4. – P. 253–258.
28. Nakashima M., Yamazaki S., Yue J., Nakagaki K. Simulation analysis of paddling motions in a single kayak: development of a comprehensive dynamic model of a paddler, paddle and hull // Journal of Sports Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 228, iss. 4. – P. 259–269.
29. Příbramský M. Tenzometrické snímání síly sledování směn v satizení lyži // Teorie ta praxe telesné výchovy. – 1976. – No. 3. – P. 169–174.
30. Sperlich J., Baker J. Biomechanical testing in elite canoeing // 20 International Symposium on Biomechanics in Sports, Cáceres, July 1–5, 2002. – P. 44–47.
31. Sperlich J., Klauk J. Biomechanics of canoe slalom: measuring techniques and diagnostic possibilities // 10 International Symposium on Biomechanics in Sports, Milan, June 15–19, 1992. – Milan, 1992. – P. 82–84.
32. Tang Z.J., Shen J.L., Liu P.L., Luo J. The simulation of paddle based on Workbench // IET International Conference on Information Science and Control Engineering, Shenzhen, 7–9 December, 2012. – Shenzhen, 2012. – P. 1–3.
33. Tullis S., Galipeau C., Morgoch D. Detailed on-water measurements of blade forces and stroke efficiencies in sprint canoe // Proceedings. – 2018. – Vol. 2. – P. 306–314.

## EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE USE OF INTELLIGENT SENSOR SYSTEMS IN THE ASSESSMENT OF BIOMECHANICAL PARAMETERS OF SPORT MOVEMENTS

V.E. Vassiouk, D.I. Guseinov, N.S. Davydova, D.A. Lukashevich, A.V. Minchenya  
(Minsk, Belarus)

The paper describes the design and software features of an intelligent sensor mounted on the oar shaft to register dynamic parameters characterizing the athlete's interaction with the oar and the surface of the water in the supporting (water) part of the stroke. As a result of the study, experimental data were obtained, an algorithm was developed to analyze the strain-load curve and calculate the components of the resulting force applied to the oar during rowing. Based on a review of the literature corresponding to the research problem, as well as the data obtained during the pilot experiment, the prospects of using intelligent sensor systems as a means of quantitative description of the performance of sports movements in natural conditions are proved. The presented mathematical algorithm for calculating the values of the individual components of the resulting effort allows us to evaluate the ratio of the efforts made by the athlete and the resulting load on the paddle blades. The results allow us to conclude that the use of the method of mobile wireless tensometry for assessing the biomechanical parameters of sports movements is promising. Ways of further improvement of the developed methodology are determined.

**Key words:** canoeing, rowing technique, intelligent sensor systems, wireless strain gauge.

*Получено 21 апреля 2020*