

# ■ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ НА БАЗЕ MEMS ТЕХНОЛОГИЙ ■

## В ОЦЕНКЕ ПОДГОТОВЛЕННОСТИ СПОРТСМЕНОВ-ГРЕБЦОВ

**Гусейнов Д.И.**

Белорусский  
государственный  
университет  
физической культуры

**Лукашевич Д.А.**

канд. пед. наук,  
Научно-  
технологический парк  
БНТУ «Политехник»

**Пермяков Т.В.**

Белорусский  
национальный  
технический  
университет

В статье представлены специально разработанные тензометрические датчики для сопряженной оценки технической и скоростно-силовой подготовленности спортсменов в безуклонной гребле, описаны особенности их калибровки и монтирования на весле спортсмена, а также предложено программное обеспечение для автоматизированной обработки зарегистрированных данных. В основе статьи результаты исследования по экспериментальной апробации датчиков в гребных локомоциях на каноэ.

**Ключевые слова:** гребля на байдарках и каноэ; тензометрические датчики; автоматизированная обработка данных; скоростно-силовая подготовленность.

### STRAIN GAUGES BASED ON MEMS TECHNOLOGIES IN ASSESSING THE PREPAREDNESS OF ATHLETES- ROWERS

The article presents specially designed strain gauges for the conjugate assessment of technical and speed-strength preparedness of athletes in both flatwater rowing and canoeing. The article also describes the features of strain gauges calibration and mounting on the athlete's paddle, and also offers software for automated processing of recorded data. The article is based on the results of a study on experimental testing of sensors in rowing locomotives in flatwater rowing.

**Keywords:** padding; strain gauges; automated data processing; speed and strength preparedness.

## ■ ВВЕДЕНИЕ

Контроль технической и скоростно-силовой подготовленности спортсменов, специализирующихся в гребле на байдарках и каноэ, является неотъемлемой частью тренировочного процесса, результаты которого целенаправленно используются при подборе средств подготовки, планировании и нормировании нагрузок. Основными критериями, определяющими возможность включения тех или иных показателей в программу контроля, являются их информативность и надежность [1].

Безуклонная гребля относится к скоростно-силовым видам спорта, предъявляющим высокие требования к анаэробным механизмам энергообеспечения спортсменов [2]. Соответственно, внешним проявлением скоростно-силовой подготовленности гребцов является мощность движений, реализуемая взрывными мышечными усилиями за минимальный промежуток времени [3]. От величины мощности движений напрямую зависит производительность каждого гребка и продвижение лодки [4, 5]. Эффективность движений гребца при

этом может быть оценена различными методами, начиная с простого измерения времени преодоления дистанции. Такие переменные, как скорость лодки на отрезке дистанции и темп, являются индикаторами производительности спортсмена и могут использоваться как достаточно простой метод для сравнения выступлений спортсмена с конкурентами, а также с собственными результатами, продемонстрированными ранее [6, 7]. Однако эти переменные не позволяют оценить уровень скоростно-силовой подготовленности, установить причинно-следственные связи достижения высокой производительности движений и понять, за счет чего гребец показывает свои результаты [8]. Это послужило толчком к появлению исследований, направленных на комплексный биомеханический контроль двигательных действий гребца, в котором учитывались бы объективные данные, всесторонне отражающие производительность и эффективность движений по кинематическим, динамическим, энергетическим и физиологическим параметрам. В частности, одним из наиболее

актуальных и востребованных сегодня направлений исследований является разработка, оптимизация и внедрение в структуру тренировочного процесса профессиональных спортсменов-гребцов полностью автономных устройств и систем измерения показателей динамических параметров гребли в естественных условиях (на воде) [9].

## ■ ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Известно, что сила и импульс силы отражают реализацию скоростно-силового потенциала спортсмена, однако для корректной оценки эффективности гребка необходимо иметь данные, характеризующие продвижение лодки за каждый гребок [10]. Для этого, помимо уже указанных силы и импульса силы, для оценки эффективности взаимодействия с водной средой, необходимо обладать данными, отражающими частоту гребков (темп), длину проводки в опорной части (амплитуда), площадь условно неподвижной опоры, мощность гребка (характеризует производительность движений спортсмена) и длину проката лодки за каждый гребок [11]. Для решения этой задачи многие исследователи прибегают к методу моделирования гоночных условий в неконкурентных или тренировочных условиях, что позволяет анализировать взаимосвязь различных параметров [12]. Однако в настоящее время данная задача не решена в полной мере, поскольку требует применения нескольких измерительных систем одновременно, что существенно усложняет процесс регистрации данных и оказывает негативное влияние на биомеханическую структуру движений спортсмена. Поэтому рассматриваемое направление можно отнести к перспективным с необходимостью преодоления всевозможных технологических ограни-

чений существующих, и уже применяемых измерительных систем.

В настоящее время отсутствуют устройства, с помощью которых возможно было бы осуществлять регистрацию параметров силы и импульса силы гребка в условиях естественных локомоций в гребле на байдарках и каноэ.

Перспективным направлением в этих целях видится использование портативных тензометрических датчиков, схемотехнически реализованных на базе MEMS технологии. Это дает возможность создания эргономичных конструкций (с малыми габаритными размерами и весом), с функционалом, позволяющим обеспечить высокочастотную регистрацию данных с высокой точностью. Такие датчики обеспечивают не только регистрацию и преобразование относительных величин механического воздействия на чувствительный элемент в электрический сигнал, но и его первичную обработку и преобразование в дискретный числовой и графический сигнал в режиме реального времени.

Цель исследования – экспериментальная апробация разработанных тензометрических датчиков в реальных условиях гребных локомоций на каноэ.

### 1. Методы и организация исследования.

В исследовании были использованы тензометрические датчики, конструктивно реализованные в формате двухсекционного измерительного устройства. Секция с датчиком соединяется с блоком регистрации данных посредством соединительных PDC (с англ. – "Power and Data cable") проводов, подключаемых в соответствующие разъемы (рисунок 1).

Секция с датчиком монтируется на древко весла посредством металлических или пластиковых

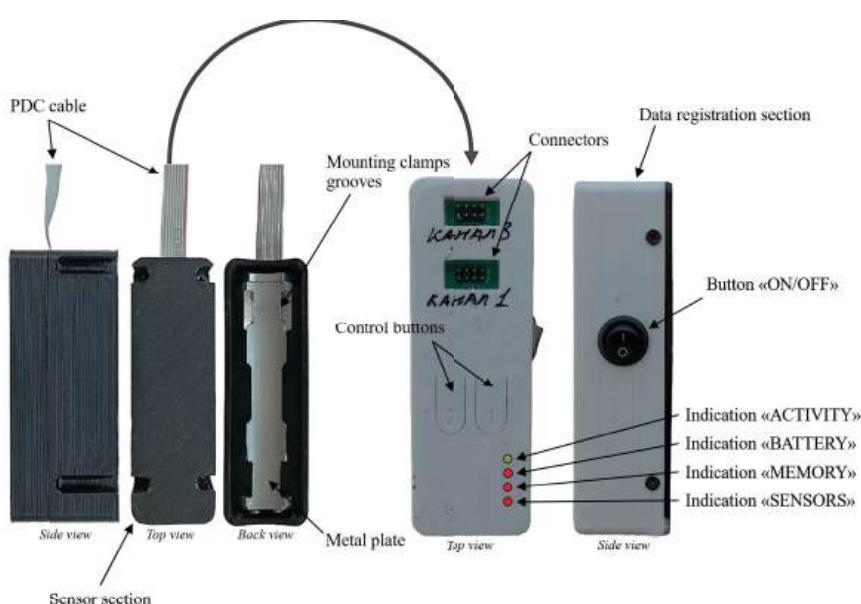


Рисунок 1 – Тензометрический датчик на весло для регистрации динамических характеристик гребка

крепежных хомутов. Чувствительный элемент, представленный тензорезистором, наклеен на упругую тонкую металлическую пластину секции с датчиком. Пластина плотно прилегает непосредственно к древку весла. Профиль металлической пластины предусматривает импровизированные канавки для крепежных хомутов. Микросхемы, органы управления и индикаторы работы и схемы режима вынесены в блок регистрации данных.

Блок регистрации данных обладает необходимыми аппаратными и программными возможностями одновременной регистрации сигналов от 4 секций с датчиками. Исходными регистрируемыми данными являются время и результирующая внешняя нагрузка, действующая на весло в процессе гребли и выраженная ньютонаами. Для обеспечения корректного использования датчиков проводится их предварительная калибровка. Функционал калибровки предустановлен в программной части блока регистрации датчиков.

### 2. Калибровка тензометрических датчиков.

Процесс калибровки состоит из нескольких обязательных стадий и может быть выполнен одновременно только для одного датчика. Вначале необходимо осуществить корректную настройку системного файла. В частности, необходимо указать вес калибровочного отягощения в ньютонах.

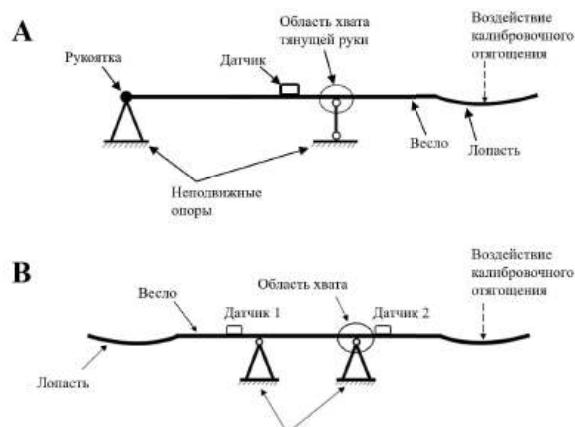


Рисунок 2 – Схемы калибровки датчиков на разных веслах

Далее необходимо закрепить весло в горизонтальном положении на двух неподвижных опорах, расположение которых соответствует хвату спортсмена (рисунок 2; А – схема калибровки датчиков, установленных на весле для гребли на каноэ; В – схема калибровки датчиков, установленных на весле для гребли на байдарках).

Опорные точки должны иметь цилиндрическое сечение, радиус которого не должен превышать радиус древка весла, что необходимо для создания точечного взаимодействия в условиях двухточечной деформации. Затем необходимо изменить режим работы устройства посредством нажатия определенной комбинации кнопок. Переход в режим калибровки будет сопровождаться соответствующей индикацией. Непосредственно процесс калибровки состоит из двух обязательных процедур: фиксирование «нулевого показателя» калибровки – ненагруженное состояние, когда на весло не воздействует никакая внешняя нагрузка, и оно расположено в горизонтальном положении на двух неподвижных опорах; фиксация «показателя нагрузки» калибровки – состояние, когда на лопасть весла воздействует калибровочное отягощение и весло расположено в горизонтальном положении на двух неподвижных опорах. Фиксация этих двух состояний осуществляется нажатием одной из кнопок управления датчиками.

Надежность, воспроизводимость и достоверность регистрируемых представленным датчиком значений подтверждены в предшествующем исследовании с использованием специально сконструированного стенда и универсальной электронной испытательной машины MTS Criterion 43 (пределы допускаемой относительной погрешности измерений силы – не более 1 %) [13].

### 3. Начало процесса регистрации данных.

Для регистрации биомеханических данных гребли весло с прикрепленными тензометрическими датчиками и блоком регистрации передается спортсмену в лодку. Провода фиксируются на предплечьях и плечах эластичными повязками (рисунок 3).



Рисунок 3 – Тензометрические датчики, закрепленные на весле спортсмена



Рисунок 4 – Активация записи данных и помещение блока регистрации в лодку

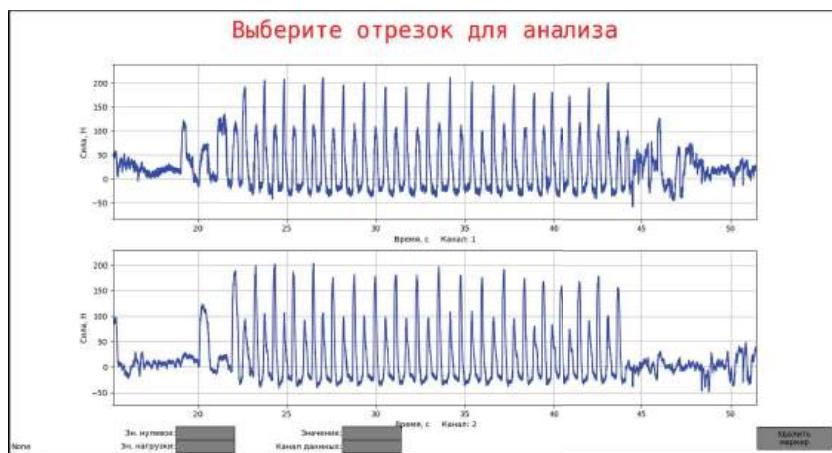


Рисунок 5 – Экран программного обеспечения для автоматизированной обработки данных с датчиков

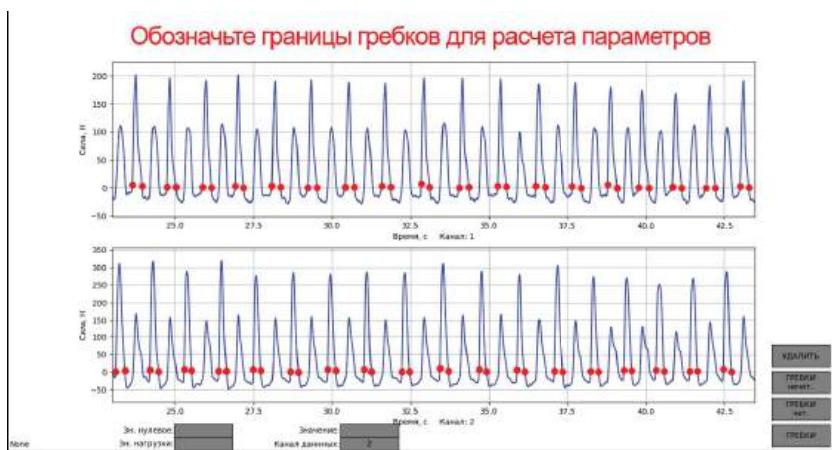


Рисунок 6 – Интерактивное обозначение границ опорной части гребков

Таблица 1 – Результаты выполнения ускорений

Датчик	$F_{\text{mean}}/N$ SD	$F_{\text{max}}/N$ SD	$F_{\text{mean}}/F_{\text{max}}/N$ SD	$t_{\text{sup}}/s$ SD	$t_c/s$ SD	T, min <sup>-1</sup> SD	I, Ns SD
Первое ускорение							
Левый	87.09 4.62	188.45 9.32	0.46 0.02	0.43 0.04	0.95 0.04	55.01 0.32	37.78 3.99
Правый	114.37 7.30	211.56 12.92	0.54 0.04	0.43 0.06	0.94 0.05	52.81 0.40	47.35 6.78
Второе ускорение							
Левый	91.28 4.11	195.94 9.08	0.47 0.02	0.42 0.03	0.91 0.05	59.05 0.27	38.44 3.28
Правый	112.73 6.94	204.11 11.70	0.55 0.04	0.44 0.04	0.93 0.04	56.84 0.36	47.76 5.50
Третье ускорение							
Левый	89.41 3.93	173.96 8.72	0.51 0.02	0.43 0.03	0.95 0.02	55.29 0.62	39.14 3.81
Правый	107.62 4.24	199.15 9.13	0.54 0.03	0.44 0.04	0.94 0.04	54.84 0.73	45.43 4.27

Немаловажно, чтобы ориентация секций с датчиками совпадала с ориентацией лопастей весла, при этом сами секции посредством PDC проводов подключаются к блоку регистрации данных.

Далее спортсмену озвучивают и разъясняют условия выполнения тестовых заданий, активируется запись данных и блок регистрации помещается в лодку (рисунок 4).

#### 4. Тестовое задание.

В пилотном эксперименте участвовал спортсмен в возрасте 17 лет с опытом выступлений в международных соревнованиях.

Спортсмену было предложено выполнить 3 ускорения с максимальной интенсивностью на дистанции 100 м. В качестве ориентиров при прохождении контрольных отрезков выступали специализированные поплавки (буи), установленные вдоль дистанции через каждые 10 метров. Между ускорениями спортсмену предоставлялся отдых до полного восстановления ЧСС.

#### 5. Обработка данных

Обработка полученных данных осуществлялась с применением специально разработанного программного обеспечения, которое позволяет автоматизировать основные манипуляции, обычно выполняемые с такими данными (рисунок 5).

Программное обеспечение позволяет в интерактивном режиме обозначить границы интересующего отрезка записи, осуществить фильтрацию с использованием цифрового фильтра со скользящим средним (величина окна фильтра также настраиваемая и выбирается пользователем), обозначить границы начала и завершения опорной части каждого гребка, входящего в пределы обозначенного ранее отрезка записи, а также рассчитывать все необходимые параметры гребли. Данное про-

граммное обеспечение может обрабатывать одновременно до 4 сигналов, а вычислительный функционал позволяет использовать его для обработки записей гребли как на байдарках, так и при гребных локомоциях на каноэ. В частности, для гребли на каноэ необходимо осуществлять расчет параметров для каждого гребка, а для гребли на байдарках – только для целевых гребков (рисунок 6).

Программное обеспечение реализовано с использованием языка программирования Python на базе публичных библиотек Pandas, NumPy и Matplotlib.

При обработке данных рассчитывались числовые значения среднего усилия ( $F_{mean}$ ) и пикового усилия ( $F_{max}$ ) каждого гребка, а также соотношение среднего усилия к пиковому ( $F_{mean}/F_{max}$ ), что может количественно характеризовать плотность гребка. Числовое значение данного параметра находится в диапазоне от 0 до 1. Чем выше значение, тем более плотный и качественный с точки зрения пропульсивной эффективности гребок. Кроме того, рассчитывались: время опорной части гребка ( $t_{sup}$ ), время цикла ( $t_c$ ), темп гребли (T). Также для лучшего понимания скоростно-силового характера гребли рассчитывались значения импульса силы (I), и рассчитаны значения стандартного отклонения (SD).

**Результаты исследования.** Результаты выполнения каждого ускорения представлены в таблице 1. Показатели SD количественно характеризуют стабильность процесса гребли.

Согласно зарегистрированным данным, у спортсмена ярко выраженная силовая асимметричность. В частности, усилия, развиваемые левой рукой, больше усилий, развиваемых правой рукой. Это является определенного рода двигательной дисфункцией, поскольку провоцирует поворот лодки влево, вынуждая спортсмена компенсировать поворот подруливанием лодки. Подобное обстоятельство снижает пропульсивную эффективность гребли. Анализируя числовые показатели SD можно утверждать, что спортсмен отличается высокой стабильностью гребли, поскольку значения стандартного отклонения не превышают 5 % от целевого показателя.

Для оценки достоверности рассчитанных данных проведена их статистическая обработка посредством двухфакторного дисперсионного ана-

лиза с повторениями (ANOVA). Подобный анализ позволяет установить, не являются ли различия анализируемых значений случайными. Числовые значения анализа представлены в таблице 2.

Результаты анализа свидетельствуют о статистически значимых различиях по 4 из 6 рассчитанных параметров ( $p < 0.05$ ). Числовые показатели  $p$ -value для параметров  $t_{sup}$  и  $I$  являются статистически незначимыми (вероятность случайности различий – 56 и 23 % соответственно).

**Обсуждение результатов.** Внедрение разработанных датчиков в гребные виды спорта сопровождается трудностями, связанными с адаптацией конструкции датчиков к амплитудным деформациям инвентаря, а также обеспечением аппаратной устойчивости к условиям повышенной влажности и погружения в воду [14]. Вместе с тем использование тензорезистивных элементов в основе датчиков является наиболее предпочтительным вариантом схемотехнической реализации, поскольку поведение тензорезистора остается стабильным как в сухих условиях, так и в условиях повышенной влажности [13]. В то же время числовые значения, получаемые с использованием тензометрических датчиков, при условии соблюдения мер по их монтажу и калибровки, являются достоверными и позволяют с достаточной степенью точности регистрировать механические напряжения, возникающие в процессе гребли, а также объективно определять показатели, характеризующие мощность движений спортсменов при взаимодействии с поверхностью воды в опорной части гребка [15].

Проектирование подобных датчиков и измерительных систем должно также сопровождаться соблюдением необходимых и достаточных мер эргономического обеспечения, что позволит улучшить механическую прочность и электрическую изоляцию, а также ликвидировать различные потенциальные двигательные ограничения, которые могут снизить достоверность регистрируемых данных [16]. По результатам анализа тематических публикаций установлено, что на практике в рамках мероприятий диагностики и контроля подготовленности спортсменов-гребцов применимы и полезны как проводная конфигурация датчиков, так и беспроводная. Однако для проведения исследований при работе с двумя и более устройствами, наиболее предпочтительным является проводной способ регистрации, который позволяет обеспечить высокочастотную регистрацию данных без потерь. Беспроводная конфигурация, в свою очередь, может быть более предпочтительна для обеспечения оперативной обратной связи, при этом данная информация будет полезна тренеру, но не самому спортсмену,

Таблица 2 – Результаты двухфакторного дисперсионного анализа с повторениями

Параметр	$F_{mean}, N$	$F_{max}, N$	$F_{mean}/F_{max}, N$	$t_{sup}, s$	$t_c, s$	$I, Ns$
p-value	0.0002	0.00007	0.000003	0.56	0.006	0.23

который полностью сконцентрирован на выполнении двигательного задания.

Для достижения высокой эффективности диагностики и контроля подготовленности гребцов необходимо определить наиболее информативные параметры контроля. Такие параметры, которые позволяли бы в необходимой и достаточной степени одновременно судить о технической и скоростно-силовой подготовленности спортсменов. Известно, что такими параметрами являются силы, развиваемые спортсменом при взаимодействии с поверхностью воды, а также их производные, в числе которых мощность движений, импульс силы, градиент силы и другие [17]. Использование датчиков, в основе которых лежат тензорезистивные элементы, в этом аспекте является наиболее предпочтительным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Апробация разработанных тензометрических датчиков показала, что спортсмен не почувствовал дискомфорта в процессе выполнения тестовых заданий, а длительность процесса сбора данных не превышала пожелания тренера. Уже сейчас имеются основания утверждать, что подобные устройства необходимы для обеспечения эффективного тренировочного процесса высококвалифицированных спортсменов-гребцов.

Количественные показатели техники гребли с использованием представленных датчиков имеют высокую объективность при сравнении индивидуальных движений с модельными значениями, а также при мониторинге динамики показателей, характеризующих скоростно-силовую подготовленность гребцов.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Kolumbet, A. N. Dynamic of kayak rowing technique in the process of competition activity / A. N. Kolumbet // Pedagogics psychology: medical-biological problems of physical training and sports. – 2017. – Vol. 4. – P. 175–179.
2. Physiology of canoeing / H. Rosdahl [et al.] // Handbook of Sports Medicine and Science: Canoeing. – 2019. – P. 47–61.
3. Benefits of specific strength training model with water resistance control gear for rowing and canoeing sports elite / P. V. Kvashuk [et al.] // Theory and Practice of Physical Culture. – 2021. – № 9. – P. 9–11.
4. Wainwright, B. A deterministic model for Olympic Sprint kayaking / B. Wainwright, C. B. Cooke, C. Low // Journal of Sports Sciences. – 2014. – Vol. 32, Issue 1. – P. 107–113.
5. Wainwright, B. Performance related technique factors in Olympic Sprint kayaking / B. Wainwright, C. Cooke, C. Low // ISBS-Conference Proceedings Archive. – 2015. – P. 1275–1278.
6. Paddling time parameters and paddling efficiency with the increase in stroke rate in kayaking / B. B. Gomes [et al.] // Sports biomechanics. – 2022. – Vol. 21. – № 10. – P. 1303–1311.
7. Determinants of boat velocity during a 200 m race in elite Paralympic sprint kayakers / A. J. Redwood-Brown [et al.] // International Journal of Performance Analysis in Sport. – 2021. – T. 21. – № 6. – P. 1178–1190.
8. Research of speed-strength qualities of specific Muscle groups in rowers / D. Oronova [et al.] // Journal of Applied Sports Sciences. – 2018. – Vol. 2. – P. 12–20.
9. Galipeau, C. The On-water Instrumentation of a Sprint Canoe Paddle : dissertation / C. Galipeau. – Hamilton, 2018. – 99 p.
10. Baker, J. Biomechanics of paddling / J. Baker // ISBS-Conference Proceedings Archive. – 2012. – P. 101–104.
11. Paddling time parameters and paddling efficiency with the increase in stroke rate in kayaking / B. B. Gomes [et al.] // Sports biomechanics. – 2022. – Vol. 21, Issue 10. – P. 1303–1311.
12. Whole-body kinematics during a simulated sprint in flat-water kayakers / Bertozi F. [et al.] // European Journal of Sport Science. – 2022. – Vol. 22, Issue 6. – P. 817–825.
13. Технологии измерения динамических параметров гребли на основе применения тензометрических систем / Д. И. Гусевы [и др.] // Российский журнал биомеханики. – 2024. – № 2 (28). – С. 114–125.
14. Use of the Paddle and Oar Instrumented as a Structural Element for Quantification of the Exercised Force – Pre-study of Strain Gauge Behavior with Simulation in Dry and Wet Environments / M. Cruz [et al.] // Proceedings of the 10th Congress of the Portuguese Society of Biomechanics, Cham, 18 February 2023 / ed. A. M. Amaro [et al.]. – Cham, 2023. – P. 453–462.
15. Smart sensors for estimation of power interaction of an athlete with water surface when paddling in the cycle of rowing locomotions / D. Lukashevich [et al.] // Journal of Complexity in Health Sciences. – 2020. – Vol. 3. – Issue 1. – P. 81–90.
16. Design and Characterization of Piezoresistive Sensors for Non-Planar Surfaces and Pressure Mapping: A Case Study on Kayak Paddle / A. R. Laaraibi [et al.] // Sensors. – 2023. – Vol. 24. – № 1. – P. 222.
17. A pilot study on the e-kayak system: A wireless DAQ suited for performance analysis in flatwater sprint kayaks / V. Bonaiuto [et al.] // Sensors. – 2020. – Vol. 20. – № 2. – P. 542.

25.10.2024