



Научная статья

DOI 10.15593/RZhBiomeh/2024.2.10

УДК 531/534: [57+61]

ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГРЕБЛИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Д.И. Гусейнов¹, Т.В. Пермяков², А.Л. Наркевич³, Д.А. Лукашевич⁴, А.В. Минченя⁵

¹ Белорусский государственный университет физической культуры, Минск, Республика Беларусь

² Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь,

³ Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

⁴ Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», Минск, Республика Беларусь

⁵ ООО "Интегрированные устройства", Минск, Республика Беларусь

О СТАТЬЕ

Получена: 26 января 2024

Одобрена: 01 июня 2024


Принята к публикации: 14 июня 2024

Ключевые слова:


гребля на байдарках и каноэ, весло, измерение усилий, тензометрические системы, градуировка


АННОТАЦИЯ

Одним из критериев эффективности биомеханики гребли является взаимодействие спортсмена с поверхностью воды посредством весла, а также эффективность передачи развиваемых спортсменом усилий в опорной части гребка на лодку для ее продвижения. Качество движений спортсмена с веслом в гребных локомоциях зависит от уровня развития скоростно-силовых способностей и может быть количественно оценено с использованием тензометрических систем. Однако отсутствие рекомендаций, описывающих особенности подготовки к использованию таких систем в тренировочном процессе, значительно снижают степень их применения. В статье рассматриваются технические особенности и методические основы применения тензометрических систем для измерения усилий спортсмена при взаимодействии с веслом в гребле на байдарках и каноэ. Для обоснования выбора схемы нагружения и закрепления весла при градуировании тензометрической системы, а также места ее непосредственного крепления на цевье авторами проведено математическое моделирование эпюр изгибающих моментов, возникающих на весле в ответ на воздействие внешних сил, в результате чего представлено три варианта опирания и ориентации весла в зависимости от расположения ключевых точек опоры. Для обоснования способа крепления тензометрической системы на цевье проведена серия испытаний с нагружением весла, в результате которой осуществлялась оценка наличия линейной связи между значениями внешней нагрузки и показаниями тензометрической системы, а также оценка повторяемости регистрируемых данных. По итогам проведенной оценки представлены рекомендации для практического применения результатов исследования в оценке скоростно-силовой подготовленности гребцов на байдарках и каноэ.

© Гусейнов Даниил Истамович – ведущий специалист, e-mail: guseynov.daniil@yandex.by  0000-0003-4812-1832

© Пермяков Трофим Васильевич – аспирант

© Наркевич Анна Леонидовна – к.т.н., доцент, e-mail: v-krivka@mail.ru  0009-0006-1775-3027

© Лукашевич Дмитрий Анатольевич – к.п.н., доцент, e-mail: dmitry.luckashewi4@yandex.by  0000-0003-3506-9430

© Минченя Александр Владимирович – директор, e-mail: alex_minch@mail.ru



Введение

Тренировочный процесс сегодня трудно представить без разнообразных измерительных систем, с помощью которых тренеры получают количественную информацию о двигательных действиях спортсменов. Основными критериями педагогической ценности такого рода систем являются информативность и оперативность получаемой информации, простота регистрации, обработки и сравнительного анализа данных по ключевым параметрам для различных спортсменов или для разных тренировочных сессий одного спортсмена [1–4].

Известно, что рациональность взаимодействия спортсмена с веслом в гребле является одним из ключевых факторов спортивной результативности [5–7]. Обусловлено это тем, что эффективность продвижения лодки зависит от физических кондиций и уровня координации движений спортсмена, обеспечивающих максимальную трансформацию усилия каждого гребка в ускорение лодки [8–10]. По этим причинам изучение процесса передачи спортсменом усилия на весло позволит повысить объективность оценки уровня технической и скоростно-силовой подготовленности атлетов в гребных локомоциях [11, 12].

Для решения данной задачи перспективным направлением является использование измерительных систем, реализованных на базе резистивных элементов для оценки динамических параметров движений спортсменов [13–15]. Вместе с тем объективность информации, получаемая с применением подобных систем, во многом определяется качеством их калибровки, местом крепления и других факторов, которые могут повлиять на точность получаемых данных [16].

Первые данные о применении проводных тензометрических систем в гребле на байдарках и каноэ появились в конце 80-х гг. прошлого столетия [17]. Однако используемые в то время системы были достаточно громоздки, анализ массива полученных данных был трудоемким и длительным, что ограничивало возможность внедрения подобных средств в широкую практику подготовки спортсменов.

По мнению ряда исследователей, закрепленная на уключине весла для академической гребли измерительная система, работающая на основе тензометрического датчика (далее – тензодатчика), позволяет точно и быстро получать сведения о значениях нагрузки в процессе гребли, что, в свою очередь, позволяет анализировать ее эффективность [18, 19]. Эти же авторы резюмируют, что установка тензодатчика не требует сложных манипуляций, его наличие не оказывает существенного влияния на биомеханическую структуру движений спортсмена, а практическая значимость обусловлена возможностью получения точных данных, которые используются для

корректировки техники гребли и улучшения спортивных показателей.

В работе [16] дается обоснование применения беспроводной измерительной системы на базе тензорезистивного датчика, закрепляемого непосредственно на весле в безуклюженной гребле (на примере каноэ), описаны его конструктивные и программные особенности, приводятся результаты испытаний измерительной системы в естественных условиях тренировки. Однако для повышения достоверности получаемых результатов необходимо иметь теоретико-экспериментальное обоснование выбора схем нагружения весла, места крепления тензодатчика на весле и обоснование методики для проведения градуировки весла с целью получения наиболее точной информации в реальных условиях гребных локомоций. Это связано с тем, что, в отличие от академической гребли, где сила, создаваемая на весле, передается на корпус спортсмена через уключины, и есть фиксированная точка привязки для расчета сил взаимодействия, в безуклюженной гребле сила, прикладываемая к веслу во время движения, передается на корпус спортсмена через опорную поверхность лодки и подушку под колено и зависит во многом от самого спортсмена [20].

Цель и задачи исследования

Цель данной работы – теоретико-экспериментальное обоснование применения тензометрических средств измерения усилий спортсмена при взаимодействии с веслом в гребле на байдарках и каноэ.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- выбор и обоснование схемы нагружения и закрепления весла при градуировании тензодатчика;
- выбор места крепления тензодатчика на весле, которое не создаст дискомфорта для спортсмена, но в то же время обеспечит наибольшую чувствительность измерительной системы;
- выбор способа крепления тензодатчика на весле, который минимизирует возможное искажение регистрируемых данных и позволит получать их линейные зависимости от внешней нагрузки;
- оценка и анализ линейности и повторяемости регистрируемых данных;
- экспериментальное определение коэффициента преобразования измерительной системы при градуировании тензодатчика;
- выработка рекомендаций для проведения градуирования измерительной системы вне зависимости от модели весла.

Объект и предмет исследования

Объект исследования – весло для гребли на каноэ с предустановленным тензодатчиком. Предмет исследования – место, способ крепления и

градуировочная характеристика, связывающая выходной сигнал тензодатчика и усилие на лопасть весла.

Для исследований была выбрана модель весла из углепласткомполита, соответствующая требованиям международных соревнований. Априори известно, что в рабочем состоянии отдельные части весла всегда неподвижны относительно друг друга, при этом условно весло разделяется на три части: лопасть, стержень (древко, цевье) и рукоятка. Лопасть весла воспринимает сопротивление воды в процессе гребка – это учитывалось нами при выборе нагружающей оснастки при выполнении градуировочных работ. По всей длине стержня исследуемого весла присутствовал технологический уклон, который принимался во внимание при выборе способа и элементов крепления тензодатчика, Т-образная рукоятка имела возможность поворота и фиксации вокруг оси стержня весла для индивидуальной настройки, при этом одна из опор при градуировании тензодатчика располагалась в эксперименте под центральной точкой рукоятки.

Тензодатчик как конструкция представляет собой металлическую балку с наклеенными тензорезисторами и заключенную в защитный корпус. В рабочем состоянии металлическая балка прилегает к поверхности стержня весла. Тензорезистор наклеен на стороне балки, противоположно прилегающей к поверхности стержня весла, причем ось тензорезистора совпадает с осью стержня весла. Таким образом, балка, повторяя упругую линию изгиба образующей стержень весла, исключала необходимость в наклейке дорогостоящих тензорезисторов непосредственно на стержень и выступала в роли экстензометра.

Работы в данном исследовании проводились с использованием материально-технической базы кафед-

ры механики и конструирования учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Методы и результаты исследования и их обсуждение

При выборе схемы нагружения весла для осуществления градуировки тензодатчика мы руководствовались схемой нагружения весла, как в процессе гребли [16]. На рис. 1 и далее наклонная пунктирная линия в области лопасти весла демонстрирует ориентацию весла относительно прикладываемых усилий.

При гребке спортсмен, прикладывая усилия $F_{ТЛ}$ и $F_{Т}$, должен преодолеть сопротивление водной среды, принятой как равнодействующая реакции R_c от нагрузки, распределенной на весло (здесь не показана). В результате этих действий произойдет перемещение лодки в направлении вектора результирующего ускорения системы a (см. рис. 1), противоположном действию реакции среды R_{C1} – горизонтальная составляющая равнодействующей R_c . Ввиду того, что прикладываемые усилия к веслу в рабочей фазе гребного цикла в несколько десятков раз превышают вес весла, в рассматриваемых ниже схемах нагружения собственным весом весла пренебрегаем.

Перечисленные усилия или их составляющие (для удобства обозначены F_i), направленные перпендикулярно оси стержня весла (рис. 2, а), приводят к изгибу стержня. Расположение точки A соответствует размещению хвата толковой руки, точки B – тянущей руки гребца; участок CE соответствует области лопасти весла. По эпюре изгибающих моментов (рис. 2, б) видно, что наибольший изгибающий момент будет в точке B .

Необходимо отметить, что распределенная нагрузка $q(z)$, Н/м, на участке CE в любой момент цикла гребка имеет непостоянное значение вдоль оси z и может быть получена умножением скоростного напора воды, Па, на значение ширины лопасти весла, м, в каждой ее точке по длине L_3+L_4 . Также распределение $q(z)$ будет зависеть от глубины погружения лопасти и от ее формы в плоскости xz . Однако характер распределения $q(z)$ никак не влияет на значения изгибающих моментов на участках стержня AB и BC , а оказывать влияние будет только значение равнодействующего усилия F_3 (показано пунктиром) и точка его приложения D (участок эпюры изгибающих моментов, построенный на участке CD для сосредоточенной силы F_3 , показан пунктиром). Выражения для изгибающих моментов на отрезке AC запишем в виде:

$$M_{\max}^x = F_1 \cdot L_1, \quad (1)$$

$$M_{AB}^x(z) = F_1 \cdot z, \quad (2)$$

$$M_{BC}^x(z) = F_1 \cdot L_1 - F_2 \cdot (z - L_1). \quad (3)$$

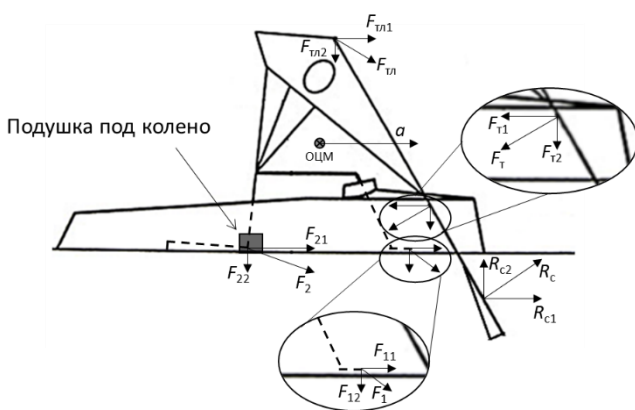


Рис. 1. Схема действующих усилий на весло в системе «спортсмен – весло – водная среда» [16]:

$F_{ТЛi}$ – усилия, создаваемые толкающей рукой спортсмена; F_{Ti} – усилия, создаваемые тянущей рукой спортсмена; R_{ci} – реакции сопротивления водной среды; F_i – силы, прикладываемые спортсменом к опорной поверхности лодки (F_1) и подушке под колено (F_2) для пропульсивного воздействия для продвижения лодки

Эти же соотношения можно использовать, если производилась градуировка, например, под усилие F_3 , а после тренировочного процесса необходимо выполнить анализ усилия, например, F_1 .

Вследствие того, что формы лопастей весел разных моделей отличаются, а также ввиду разной глубины погружения весла в рабочей фазе гребного цикла, как упоминалось выше, примем для определенности при градуировании тензодатчика (а в дальнейшем – и для оценки работы спортсмена), что усилие F_3 сосредоточено на половине длины лопасти весла, т.е. $L_3=L_4$.

Для реализации схемы нагружения при градуировании тензодатчика возможны три схемы его опирания показанные на рис. 3, в которых, в свою очередь, шарнирно подвижная и шарнирно неподвижная опоры могут меняться местами. Весло в каждой из схем нагружения должно быть ориентировано таким образом, чтобы зоны растяжения и сжатия на стержне весла соответствовали условиям эксплуатации.

Выбор схемы опирания опор не влияет на результаты измерения и будет зависеть только от технических возможностей оснастки измерительного стенда или оборудования, что значительно расширяет возможности для градуировки любых моделей весла в условиях тренировочной базы.

Для осуществления корректной градуировки необходимо произвести нагружение во всем диапазоне возможных усилий, которые прикладываются к веслу в процессе эксплуатации. В качестве исходных данных об усилиях может выступать значение любой из сил – F_1 , F_2 или F_3 , вне зависимости, какая из схем опирания выбрана. А активную силу, которая будет прикладываться к веслу, в ходе градуировки по известной силе и размерам можно рассчитать, выразив ее из следующих уравнений сумм моментов относительно точек на весле (см. рис. 3):

$$\sum M_A = 0: F_2 \cdot L_1 - F_3 \cdot (L_1 + L_2 + L_3) = 0, \quad (4)$$

$$\sum M_B = 0: F_1 \cdot L_1 - F_3 \cdot (L_2 + L_3) = 0, \quad (5)$$

$$\sum M_D = 0: F_1 \cdot (L_1 + L_2 + L_3) - F_2 \cdot (L_2 + L_3) = 0. \quad (6)$$

Длины (размеры L_i) индивидуальны для каждой модели весла, а также зависят от антропометрии спортсмена, который выбирает место хвата (точка B , см. рис. 3) на стержне весла. Индивидуальное расположение точки B определяют как точку между средним и безымянным пальцами тянущей руки при ее охвате стержня весла в рабочем режиме.

На расположение тензодатчика на стержне весла влияют несколько факторов.

Участок стержня весла с закрепленным тензодатчиком показан на рис. 4.

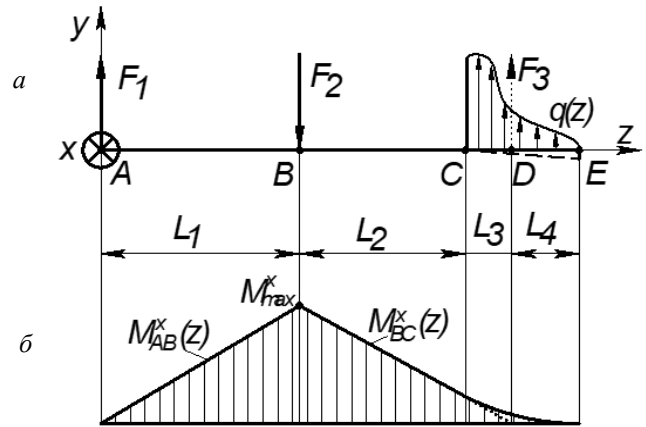


Рис. 2. Схема нагружения весла усилиями, перпендикулярными оси стержня (а), с эпюрой изгибающих моментов (б)

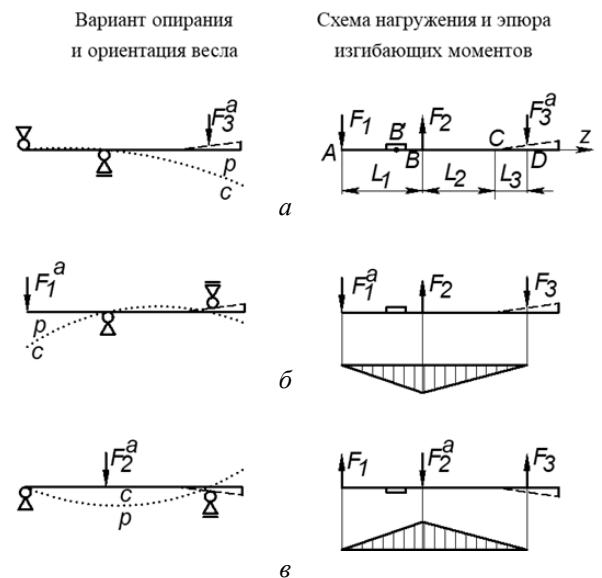


Рис. 3. Варианты опирания и ориентации весла для реализации схем нагружения при градуировании тензодатчика: пунктиром – деформированное состояние весла; а – для активной силы; б – растяжение; в – сжатие

Положение оси x естественным образом определяется как прямая, параллельная плоскости лопасти весла, проходящей через точку D (см. рис. 2 и 3).

Ввиду относительно жесткой конструкции стержня весла, а также с учетом допустимых деформаций для тензорезистора целесообразно располагать тензодатчик в области с наибольшими возможными деформациями весла. Известно, что при изгибе линейные деформации продольных слоев стержня весла, на которые фактически реагирует тензодатчик изменением выходного сигнала, прямо пропорциональны изгибающему моменту и имеют

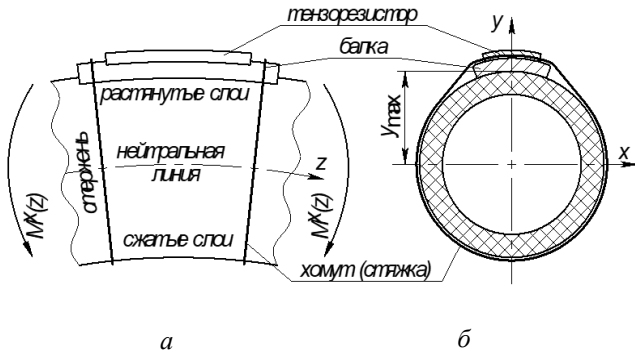


Рис. 4. Деформированное состояние стержня весла и тензодатчика под действием изгибающего момента $M^x(z)$ (а) и поперечное сечение стержня в месте установки тензодатчика (б)



Рис. 5. Лопать весла и индентор для приложения нагрузки F_3^a в точке D , закрепленный в захвате испытательной машины *MTS Criterion 43*

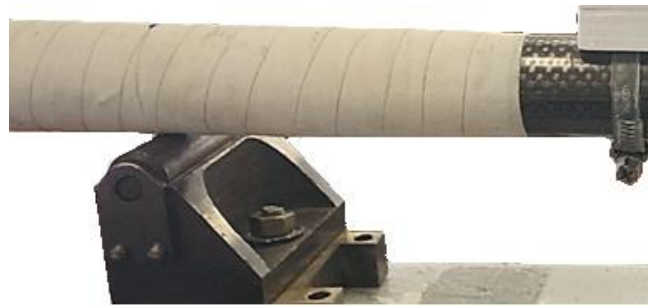


Рис. 6. Стержень весла на шарнирной опоре в точке B

наибольшие значения на поверхности стержня в точке, наиболее удаленной от нейтральной линии (см. рис. 4):

$$\varepsilon_{\max}(z) \propto M^x(z) \cdot y_{\max}. \quad (7)$$

Однако размещение тензодатчика непосредственно в точке B действия максимального изгибающего момента M_{\max}^x не представляется возможным, так как в этой точке осуществляется охват цевья рукой спортсмена. Поэтому расположение тензодатчика, заключенного в корпус (точка B' на рис. 3 – центр тензорезистора датчика), в осевом направлении должно быть смещено от точки B в направлении к точке A (предпочтительно) или к точке C на минимально допустимое расстояние, которое не доставит дискомфорт спортсмену при управлении веслом в процессе гребли. Расстояние от точки B до торцевой грани корпуса датчика может составлять около 10–15 см.

Для дальнейших исследований выбрана схема нагружения, изображенная на рис. 3, а. Для создания нагрузки F_3^a в точке D применялась универсальная электронная испытательная машина *MTS Criterion 43* (пределы допускаемой относительной погрешности измерений силы – не более 1 %), позволяющая производить нагружение с постоянной скоростью и в заданном диапазоне нагрузок. В качестве индентора

использовали трубку радиусом 8 мм, горизонтально зафиксированную в верхнем захвате, длиной, превышающей ширину лопасти весла в точке D (рис. 5).

Для опирания весла в точках A и B собрана жесткая рамная конструкция как продолжение платформы испытательной машины: в точке A реализована шарнирно-неподвижная опора, а в точке B – шарнирно-подвижная опора (рис. 6) с радиусами скругления по 10 мм.

При нагружении весла для перемещения траверсы испытательной машины необходимо задавать скорость нагружения, а не скорость перемещения траверсы (в исследованиях принята скорость нагружения $\dot{F} = 160 \text{ Н/мин} = 2,667 \text{ Н/с}$), чтобы исключить возможную нелинейность зависимости нагрузки от перемещения траверсы на начальном участке деформирования, что, в свою очередь, может исказить оценку данных выходного сигнала тензодатчика. Таким образом, зависимость нагрузки F_3^a от времени t_F в процессе нагружения имеет линейную зависимость, коэффициент корреляции для которой по результатам холостых (без применения тензодатчика) нагружений составил 1,0.

При выборе способа крепления тензодатчика на стержне весла необходимо учесть, что при изгибе стержня, кроме линейных продольных деформаций,

происходят также сдвиги слоев поперечного сечения относительно друг друга параллельно нейтральной линии. Тем более такие сдвиги будут происходить в месте сопряжения стержня весла и балки тензодатчика. Для минимизации сдвигов при изгибе стержня весла и для получения наибольшей чувствительности тензодатчика балка тензодатчика должна максимально близко прилегать к поверхности стержня весла и быть жестко на нем закреплена. После прекращения действия нагрузок, вызвавших изгиб стержня весла, балка тензодатчика должна возвращаться в исходное состояние. Но при этом применяемые крепежные элементы и поверхность балки тензодатчика не должны приводить к повреждениям поверхностного слоя стержня весла как при установке на весло, так и при циклическом его нагружении в процессе гребли.

Тем не менее сдвиг балки тензодатчика относительно поверхности стержня весла также допускается, но деформации тензорезистора в этом случае будут ниже, чем в вышеописанном случае.

В любом случае наличие на участке весла тензодатчика не должно искажать его упругую линию, а в балке тензодатчика не должны проявляться дополнительные деформации, не характерные для изгиба.

Балка используемого в исследованиях тензодатчика, как показано на рис. 4, имела изогнутое поперечное сечение, практически повторяющее внешний контур стержня весла, а для крепления балки тензодатчика к стержню весла применили хомуты и стяжки.

Нами осуществлялась проверка трех способов крепления тензодатчика, описание которых приведено

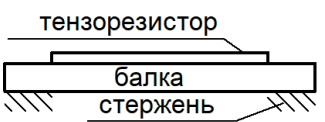

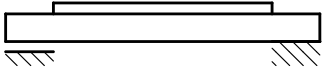

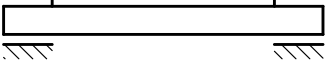

в табл. 1. Металлические хомуты обеспечивают наибольшее сцепление между балкой и стержнем, поэтому такой тип крепления для схем 1 и 2 приняли в качестве жесткой заделки. Антифрикционная прослойка (в эксперименте – двусторонняя силиконизированная бумага) в связке с более податливыми пластмассовыми стяжками позволили реализовать продольное скольжение балки в схемах 2 и 3 относительно стержня при его изгибе. Для более плотного прилегания тензодатчика к стержню, но при этом для сохранения подвижности, применяли пару узких стяжек на одно крепление.

Нагружение во всех испытаниях проводили до наиболее характерного значения максимальной нагрузки на лопасть весла $F_3^a = 320\text{Н}$. В процессе нагружения производили записи в отдельные массивы данных показаний тензодатчика с частотой 270 Гц (на карту памяти регистрирующей системы) и показаний внешней нагрузки с частотой 10 Гц (во временный файл записи данных испытания); начинали и заканчивали записи синхронно. Затем по полученным массивам данных строили зависимости для показаний выходного сигнала тензодатчика U от времени t_U и для значений нагрузки F_3^a от времени t_F (рис. 7).

Так как графики зависимости нагрузки F_3^a от времени t_F представляли собой линейные зависимости также с коэффициентом корреляции 1,0, то это позволило график зависимости U от t_U «перевести» в градуировочную характеристику U от F_3^a (выходной сигнал тензодатчика от внешней нагрузки), умножив каждое значение времени, в которое фиксировался вы-

Таблица 1

Способы крепления тензодатчика на стержне весла

Номер способа и схема закрепления	Иллюстрация реализации способа
<p style="text-align: center;">1.</p>  <p style="text-align: center;">тензорезистор балка стержень</p> <p>Металл. хомут Металл. хомут</p>	
<p style="text-align: center;">2.</p>  <p>Пара пластмасс. стяжек и антифрикц. прослойка Металл. хомут</p>	
<p style="text-align: center;">3.</p>  <p>Пара пластмасс. стяжек и антифрикц. прослойка Пара пластмасс. стяжек и антифрикц. прослойка</p>	

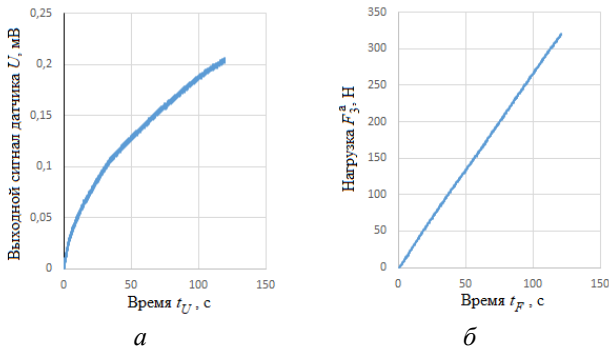


Рис. 7. Зависимости показаний тензодатчика U от времени t_U (а) и нагрузки F_3^a от времени t_F (б) на примере испытания № 1 для 1-го способа закрепления

ходной сигнал тензодатчика, на скорость нагружения \dot{F} :

$$F_3^a = t_U \cdot \dot{F}. \quad (8)$$

Для каждого способа закрепления производили по пять испытаний, причем перед каждым испытанием снимали тензодатчик и устанавливали снова по меткам, имитируя реальные условия использования тензодатчика, когда после монтажа датчика на стержень весла и проведения процедуры градуировки возможен его демонтаж до момента непосредственного использования тензодатчика в тренировочном процессе.

Результаты построения графиков для всех способов закрепления приведены на рис. 8 в одной системе координат; ввиду наложения графиков отдельных испытаний для 2-го и 3-го способов закрепления (табл. 1) для них приведены по одному графику. Наблюдения и выводы по результатам испытаний по 1-му способу закрепления следующие. В первом же эксперименте (№ 1 на рис. 8) получили зависимость, условно состоящую из трех участков: короткий начальный линейный, переходной нелинейный и наиболее продолжительный линейный. То есть наблюдалось начальное «жесткое» поведение тензодатчика, когда значительные изменения выходного сигнала соответствовали незначительным изменениям нагрузки, и конечное «податливое» поведение тензодатчика, когда тем же изменениям выходного сигнала соответствовали большие изменения значений нагрузки. Связав такое поведение с недостаточной затяжкой хомута и сдвигами поверхности балки относительно поверхности стержня весла, производили постепенное увеличение момента затяжки (от испытания № 2 до испытания № 5, см. рис. 8), что, естественно, приводило к расширению участка «жесткого» поведения тензодатчика примерно до 10 Н, но после прохождения переходного участка, начиная с нагрузки примерно 100 Н, «податливое» поведение датчика повторялось: графики зависимости на завершающих № 1 – 5 практически параллельны.

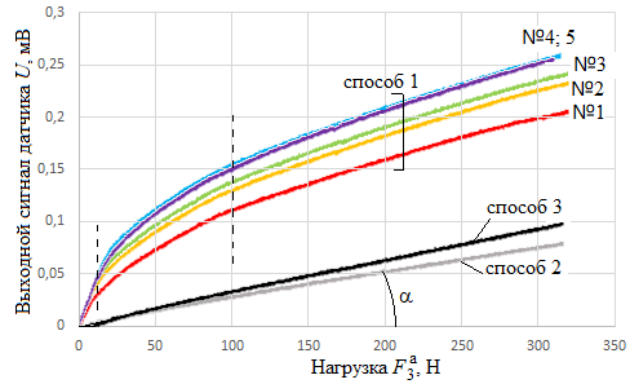


Рис. 8. Зависимость выходного сигнала тензодатчика от прикладываемой внешней нагрузки F_3^a ; пунктиром показаны условно границы участков

Дальнейшее повышение момента неизбежно приведет к повреждению поверхности стержня весла. Необходимо отметить, что при невысоких значениях нагрузки, а также при возможности жесткого закрепления тензодатчика на поверхности инвентаря 1-й способ закрепления будет полезен, но не будет приемлемым для весел в безключенной гребле. Однако способность металлического хомута надежно удерживать балку тензодатчика в фиксированном положении использовали для проверки 2-го способа закрепления.

При использовании 2-го и 3-го способов закрепления тензодатчика путем применения пар стяжек обеспечивалось плотное прилегание поверхности балки тензодатчика к поверхности стержня весла, а применение антифрикционной прослойки способствовало беспрепятственному сдвигу сопрягаемых поверхностей друг относительно друга в процессе изгиба стержня: для 2-го способа закрепления – с одной стороны, для 3-го способа закрепления – с двух сторон. Для обоих случаев получали линейные зависимости во всем диапазоне нагрузок (см. рис. 8).

Для объективной оценки наличия линейной связи между значениями внешней нагрузки и показаниями тензодатчика использовали коэффициент корреляции и коэффициента аппроксимации, полученные при обработке данных в программе *Excel* (табл. 2).

Значения, представленные в табл. 2, показывают, что для обоих случаев полученных данных характерна высокая степень соответствия модели линейной зависимости между внешней нагрузкой на лопасть весла и значениями выходного сигнала тензодатчика, закрепленного в центральной части стержня весла. Значение коэффициента аппроксимации, близкое к 1,0, свидетельствует о наличии функциональной линейной зависимости, что вполне объясняется физической природой рабочей части тензорезистора и линейной зависимостью между деформацией и внешним усилием при изгибе для материала весла.

Для оценки повторяемости регистрируемых тензометрической системой данных в каждой группе

Таблица 2

**Численная оценка линейных зависимостей
(в скобках – коэффициенты вариации, %)**

Способ крепления	Среднее значение коэффициента корреляции	Среднее значение коэффициента аппроксимации
2	0,9991 (0,007)	0,9982 (0,018)
3	0,9924 (1,047)	0,9849 (2,247)

Таблица 3

Статистические характеристики для тангенса угла наклона α линейной зависимости

Способ закрепления	Среднее значение, мВ/Н	Коэффициент вариации, %
2	$0,2363 \cdot 10^{-3}$	1,14
3	$0,2986 \cdot 10^{-3}$	1,67

испытаний (для 2-го и 3-го способов) в условиях лаборатории воспользуемся расчетом и анализом следующих параметров: коэффициента вариации тангенса угла наклона α для линейной зависимости (см. рис. 8) и Евклидовой метрики.

Расчет Евклидовой метрики для двух массивов показаний тензодатчика p_k и q_k по известной формуле позволяет получить абсолютные значения:

$$d(p, q) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (p_k - q_k)^2}. \quad (9)$$

Ввиду очевидного различия данных в отдельных выборках (2-й и 3-й способы) для более объективной оценки применим отношение Евклидовой метрики к наибольшему значению в массивах данных p_k и q_k . Результаты расчета представлены в табл. 4.

Анализируя относительные значения евклидовой метрики для измерительной системы, можно сделать вывод, что повторяемость регистрируемых системой данных для 2-го и 3-го способов закрепления может быть охарактеризована как высокая.

Отметим, что 3-й тип крепления ввиду свободы смещения в продольном направлении с обеих сторон вследствие конусности стержня, а также отсутствия препятствия повороту в окружном направлении вследствие цилиндрической внешней поверхности стержня окажет в итоге влияние на стабильность и корректность данных тензодатчика, т.е. для измерений в данной конструкции 3-й способ закрепления тензодатчика непригоден. А крепление балки тензодатчика металлическим хомутом только с одной стороны предотвращает относительное смещение как в продольном, так и в окружном направлении, надежно фиксируя один конец балки тензодатчика. Причем устанавливать металлический хомут целесообразно на том конце балки тензодатчика, который находится над участком с большим диаметром стержня весла для сохранения плотного прилегания балки датчика к

стержню весла. Итак, наиболее приемлемым способом крепления обоснованно является 2-й способ (см. табл. 1), который минимизирует возможное искажение регистрируемых данных, позволяет получать их линейные зависимости от внешней нагрузки с хорошей повторяемостью данных, связанных с внешним усилием на весло. Для обработки данных тензодатчика, естественно, необходим коэффициент преобразования измерительной системы, который переведет данные выходного сигнала тензодатчика в мВ в значения усилий в Н.

Тангенс угла наклона α для графиков линейной зависимости на рис. 8, построенных по вышеописанной методике, фактически можно считать коэффициентом преобразования k_U , измеряемого в единицах мВ/Н, его значение можно легко получить после построения линии регрессии, например, в программе *Excel*. Но для практического применения используем обратную величину в единицах измерения Н/мВ:

$$k_F = 1/k_U. \quad (10)$$

Например, по результатам испытаний для 2-го способа закрепления для определенной модели весла с заданным местом хвата спортсмена в центральной части стержня весла получено значение $k_U = 0,2363 \cdot 10^{-3}$ мВ/Н, тогда по формуле (6) $k_F = 4232$ Н/мВ.

На полученный коэффициент умножают значения выходного сигнала тензодатчика, получая искомые усилия на весло в процессе гребли с течением времени.

Рекомендации для практического применения результатов исследования в оценке скоростно-силовой подготовленности гребцов

Коэффициент преобразования для каждой модели и размера весла, а также при использовании весла конкретным спортсменом будет иметь индивидуальное значение.

Тензодатчик в условиях лаборатории по запросу спортивной организации может быть отградуирован с применением автоматизированной системы нагружения испытательной машины практически для любого весла и с учетом индивидуальных данных спортсмена.

Но для широкого применения измерительной системы целесообразно производить градуировку тензодатчика непосредственно в условиях тренировочной базы. Наиболее приемлемым вариантом опирания весла в условиях тренировочной базы целесообразно использовать схему (см. рис. 3, в), когда обе опоры находятся под веслом. Дальнейшие рекомендации приводятся для этой схемы.

В любом случае до установки весла на опоры необходимо определить положение точки B (см. рис. 3) по расположению хвата спортсмена. Затем, отступив 10 – 15 см от точки B предпочтительно в сторону точки A , отметить границу, где будет прикладываться корпус а

**Относительные значения Евклидовой метрики
(10⁻³%) для данных тензорезистора**

Способ крепления	Сравниваемые пары испытаний									
	1↔2	1↔3	1↔4	1↔5	2↔3	2↔4	2↔5	3↔4	3↔5	4↔5
2	6,19	7,08	8,81	9,95	1,79	3,43	4,48	1,78	2,91	2,91
3	4,37	7,51	7,15	7,79	4,86	5,02	5,82	1,79	2,19	0,66

тензодатчика, с помощью клейкой ленты по периметру окружности поперечного сечения стержня весла. На основании этой разметки отметить положение центра тензодатчика в осевом направлении и произвести его закрепление 2-м способом (см. табл. 1) неплотно для возможности его поворота при корректировке положения в окружном направлении.

Ввиду сложной геометрии рукоятки допустимо опирание в точке *A* (см. рис. 3) производить в месте сопряжения стержня и рукоятки, так как расстояние от центра рукоятки до места сопряжения мало, по сравнению с длиной стержня весла.

Затем отметить положение точки *D* (см. рис. 3) на середине длины лопасти весла. После размещения лопасти весла на горизонтальной опорах, в частности – в точке *D*, естественным образом определится ориентация тензодатчика в окружном направлении, что позволит окончательно зафиксировать тензодатчик в рабочем положении (в выбранной схеме датчик будет находиться в нижней части весла – см. рис. 3). Здесь также важно выполнить нестираемую разметку положения датчика (или его корпуса) при градуировке на случай, если датчик необходимо демонтировать до проведения тренировки совместно с ним.

Нагружение весла для фиксации усилия необходимо производить ступенчато любыми доступными грузами (разновесы, гири и т.п.). Рекомендуется количество ступеней нагружения – 5–10, количество повторов нагружения – 5–7, уровень максимальной нагрузки – 30–50 % от максимальной ожидаемой нагрузки F_2^a в точке В при эксплуатации весла в процессе гребли. Предварительное нагружение следует выполнять грузом массой 1–1,5 кг (может быть в составе держателя грузов) для того, чтобы выбрать все зазоры в опорах. Также рекомендуется произвести полное нагружение в холостом режиме (без съема данных тензодатчика). Установку каждого из грузов на держатель грузов необходимо производить плавно в течение не более 5 с, а затем выдерживать под этой нагрузкой примерно 3–5 с. Таким образом полное нагружение весла произойдет в течение 1–2 мин, что не вызовет процесса кратковременной ползучести в весле. Между каждым циклом нагружения выдержать 2–3 мин весло без нагрузки для восстановления формы, при этом от предварительного груза весло не освобождать.

После завершения всех циклов нагружения следует построить график зависимости выходного сигнала тензодатчика от времени. Если нагружение выполнено

правильно, график будет представлять собой чередование участков возрастания сигнала с участками практически неизменного сигнала (плато).

Затем на каждом плато данных найти среднее значение сигнала, соответствующих определенной ступени нагрузки на весло. Построить зависимости в координатах «среднее значение сигнала, мВ – нагрузка, Н», проверить наличие между ними линейной зависимости, построить линию тренда, например, в программе *Excel* и определить коэффициент преобразования (Н/мВ), равный тангенсу угла наклона линии тренда.

Заключение

Впервые разработана и апробирована измерительная система для оценки скоростно-силовой подготовленности спортсменов в условиях гребных локомотивов на байдарках и каноэ. Показано, что градуирование измерительной системы можно проводить как в условиях лаборатории, так и в условиях тренировочной базы для разных моделей весел с учетом индивидуальных особенностей спортсменов.

Теоретически обосновано применение градуировочных работ в любой их трех предложенных схем нагружения, наиболее полно имитирующих работу веслом в реальных условиях гребли. На выбор схемы нагружения оказывают влияние только технические возможности оснастки измерительного стенда или оборудования при проведении процедуры градуировки тензодатчика.

Установку тензодатчика необходимо ориентировать относительно оси стержня весла таким образом, чтобы он располагался над той частью стержня весла, которая испытывает при градуировке наибольшие деформации растяжения. В продольном направлении датчик располагается как можно ближе к точке хвата весла спортсменом, не создавая дискомфорта при управлении веслом.

Экспериментально доказано, что на показания тензодатчика в значительной мере влияет способ его закрепления на стержне весла. При этом обоснована наиболее приемлемая схема, при которой один конец балки тензодатчика закрепляется металлическим хомутом, обеспечивая наибольшее сцепление между балкой и стержнем весла, а другой конец балки фиксируется парой пластиковых стяжек в сочетании с антифрикционной прослойкой. Такой способ

крепления обеспечивает возможность продольного скольжения балки тензодатчика относительно стержня весла при его изгибе. Таким образом, гарантируется линейная зависимость между показаниями датчика и внешней нагрузкой, а также хорошая воспроизводимость данных.

Установлено, что для осуществления градуировки с помощью нагружающего устройства испытательной машины необходимо обеспечить постоянную скорость возрастания нагрузки. Такая методика значительно упрощает построение зависимости «выходное напряжение – внешняя нагрузка» и коэффициентом преобразования тензодатчика. Коэффициентом

преобразования в данном случае является обратная величина тангенса угла наклона α линии регрессии данных зависимости выходного напряжения тензодатчика от прикладываемого внешнего усилия.

Полученные в рамках исследования результаты также могут быть полезны при конструировании измерительных устройств аналогичного назначения.

Работа выполнена при поддержке гранта БРФФИ № Г22УЗБ-006 «Разработка методики контроля технической и скоростно-силовой подготовленности высококвалифицированных спортсменов в гребле на байдарках с использованием интеллектуальных сенсорных систем».

Список литературы

1. Rajšp, A. A systematic literature review of intelligent data analysis methods for smart sport training / A. Rajšp, I. Fister // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10, – no. 9. – P. 3013.
2. Goo, M., Systematic review of using portable smart devices to teach functional skills to students with intellectual disability / M. Goo, A.L. Maurer, M.L. Wehmeyer // *Education and Training in Autism and Developmental Disabilities*. – 2019. – Vol. 54, – no. 1. – P. 57–68.
3. Liu, J.W. An intelligent identification model for the selection of elite rowers by incorporating internet-of-things technology / J.W. Liu, S.H. Chen, Y.C. Huang, C.T. Wang. // *Ieee Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 31234–31244.
4. Rowing talent identification based on main and weighted criteria from the analytic hierarchy process // *Journal of Engineering Science and Technology* / D. Nurjaya, A.G. Abdullah, A. Ma'mun, A. Rusdiana – 2020. – Vol. 15, – no. 6. – P. 372–337
5. Baudouin, A. A biomechanical review of factors affecting rowing performance / A. Baudouin, D. Hawkins, S. Seiler // *British Journal of Sports Medicine*. – 2002. – Vol. 36, – no. 6. – P. 396.
6. Rongère, F. Dynamic modeling and simulation of rowing with a robotics formalism / F. Rongère, W. Khalil, J. M. Kobus // 2011 16th International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics. – IEEE, – 2011. – P. 260–265.
7. Caplan, N. A review of propulsive mechanisms in rowing / N. Caplan, A. Coppel, T. Gardner // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*. – 2010. – Vol. 224, no. 1. – P. 1–8.
8. Zatsiorsky, V.M. Mechanics and biomechanics of rowing: a review / V.M. Zatsiorsky, N. Yakunin // *Journal of Applied Biomechanics*. – 1991. – Vol. 7, no. 3. – P. 229–281.
9. Rowing biomechanics, physiology and hydrodynamic: a systematic review / M.N. Harun, A.A.M. Yusof, F.A. Nasruddin, A. Syahrom // *International Journal of Sports Medicine*. – 2020. – P. 577–585.
10. Caplan, N. A review of propulsive mechanisms in rowing / N. Caplan, A. Coppel, T. Gardner // *Journal of Sports Engineering and Technology*. – 2010. – Vol. 224, no. 1. – P. 1–8.
11. Simulating the fluid dynamic behaviour of oar blades in competition rowing / A.T. Coppel, H. Garden, N. Caplan, D. Hargreaves // *Journal of Sports Engineering and Technology*. – 2010. – Vol. 224, no. 1. – P. 25–35.
12. Caplan, N.A Mathematical model of the oar blade–water interaction in rowing / N. Caplan, T. Gardner // *Journal of Sports Sciences*. – 2007. – Vol. 25, no. 9. – P. 1025–1034.
13. Cirmirakis, D. Rowing optimization / D. Cirmirakis, J.K. Pollard // 2009 IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. – IEEE. – 2009. – P. 159–161.
14. Smart sensors for estimation of power interaction of an athlete with water surface when paddling in the cycle of rowing locomotions / D. Lukashevich, D. Guseinov, A. Minchenya, A. Bubulis // *Journal of Complexity in Health Sciences*. – 2020. – Vol. 3, no. 1. – P. 81–90.
15. Rowing on a boat versus rowing on an ergo-meter: a biomechanical and electromyographycal preliminary study / G. Marcolin, A. Lentola, A. Paoli, N. Petrone // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 112. – P. 461–466.
16. Экспериментальное обоснование применения интеллектуальных сенсорных систем в оценке биомеханических параметров спортивных движений / В.Е. Васюк, Д.И. Гусейнов, Н.С. Давыдова, Д.А. Лукашевич, А.В. Минченя // *Российский журнал биомеханики*. – 2020. – Т. 24, № 3. – С. 300–311.
17. Верлин, Р.В. Построение годовичного цикла тренировки высококвалифицированных гребцов на байдарках, специализирующихся в спринте. Автореф. дис.... канд. пед. наук / Р.В. Верлин М.: Федеральный научный центр физической культуры и спорта. – 2015.
18. Гусейнов, Д.И. Возможности использования специальных технических средств в гребле на байдарках и каноэ для оценки динамических параметров выполнения соревновательного упражнения / Д.И. Гусейнов // *Новые горизонты – 2018: сборник материалов Белорусско-Китайского молодежного инновационного форум*. – 2018. – Т. 1. – С. 75–77.
19. Лукашевич, Д.А. Возможности использования технических средств в оценке мощности движений спортсменов-гребцов / Д.А. Лукашевич, Д.И. Гусейнов, А.В. Минченя // *Ученые записки Белорусского государственного университета физической культуры*. – 2018. – № 21. – С. 115–126.
20. Зеленин, Л.А. Особенности устройства тренажёра для каноэ и эффекты при его применении / Л.А. Зеленин, В.Д. Медведков // *Педагогико-психологические и медико-биологические проблемы физической культуры и спорта*. – 2011. – № 3. – С. 64–69.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта БРФФИ № Г22УЗБ-006 «Разработка методики контроля технической и скоростно-силовой подготовленности высококвалифицированных спортсменов в гребле на байдарках с использованием интеллектуальных сенсорных систем». Результаты получены с использованием ресурсов Белорусского государственного технологического университета.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

TECHNOLOGIES FOR MEASURING THE DYNAMIC PARAMETERS OF ROWING BASED ON STRAIN GAUGE SYSTEMS

D.I. Guseinov¹, T. Permyakov², H.L. Narkevich³, D.A. Lukashevich⁴, A.V. Minchenya⁵

¹ Belarusian State University of Physical Culture, Minsk, Republic of Belarus

² Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

³ Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

⁴ Scientific and Technological Park of BNTU "Polytechnic", Minsk, Republic of Belarus

⁵ LLC "Integrated Devices", Minsk, Republic of Belarus

ARTICLE INFO

Received: 26 January 2024
Approved: 01 June 2024
Accepted for publication: 14 June 2024

Key words:

flatwater kayaking and canoeing, paddle, force measurement, strain gauge systems, graduation

ABSTRACT

One of the criteria for the effectiveness of flatwater rowing biomechanics is the interaction of the athlete with the surface of the water by an oar, as well as the effectiveness of transferring the efforts developed by the athlete to the boat for its advancement. The quality of an athlete's movements with a paddle in rowing locomotives depends on the level of development of power abilities and can be quantified using strain gauge systems. However, the lack of recommendations describing the specifics of the preparation and use of such systems in training process significantly reduce the degree of their use. The article discusses the technical features and methodological foundations of the use of strain gauge systems to measure the efforts of an athlete when interacting with an oar in flatwater kayaking and canoeing. To substantiate the choice of the scheme of loading and securing the paddle when graduating the strain gauge system, as well as the place of its direct attachment to the forearm, the authors carried out mathematical modeling of diagrams of bending moments arising on the paddle in response to external forces, as a result of which three options for the support and orientation of the paddle are presented, depending on the location of key support points. To substantiate the method of attaching the strain gauge system to the forearm, a series of tests with paddle loading was carried out, as a result of which the presence of a linear relationship between the values of the external load and the readings of the strain gauge system was assessed, as well as the repeatability of the recorded data. Based on the results of the assessment, recommendations are presented for the practical application of the results of the study in assessing the speed and strength training of rowers on kayaks and canoes.
