

ЛЕСОВЕДЕНИЕ, ЛЕСОВОДСТВО, ЛЕСНЫЕ КУЛЬТУРЫ, АГРОЛЕСОМЕЛИОРАЦИЯ, ОЗЕЛЕНЕНИЕ,
ЛЕСНАЯ ПИРОЛОГИЯ И ТАКСАЦИЯ/FORESTRY, FORESTRY, FOREST CROPS, AGROFORESTRY,
LANDSCAPING, FOREST PYROLOGY AND TAXATION

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.39.6>

КОНЦЕПТ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ ОРГАНИЗМА РАБОЧЕГО,
ЗАНЯТОГО В ЛЕСНОЙ ОТРАСЛИ

Научная статья

Васильев А.^{1,*}, Суханов Ю.²

¹ ORCID : 0000-0003-2349-5600;

² ORCID : 0000-0002-1517-5538;

^{1,2} Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (alvas1979[at]mail.ru)

Аннотация

В настоящее время, с развитием техники и технологий, все больше внимания уделяется поиску технических решений по снижению утомляемости рабочих, занятых тяжелым физическим трудом. Одним из решений данной проблемы является разработка экзоскелетов, воспринимающих часть нагрузки и снижающих потребные усилия работника. Каждая профессия, с учетом особенностей физических движений и нагрузок, требует индивидуального подхода к конструкции экзоскелета. К примеру, изучение существующих конструкций экзоскелетов показало, что в настоящее время отсутствуют промышленные изделия, предназначенные специально для вальщиков леса и операторов мотокусторезов. Разработка экзоскелета для работающих в лесу рабочих, выполняющих свои трудовые обязанности с использованием ручного бензоинструмента, требует проведения исследований по оценке эффективности и удобства применения экзоскелета, что, в свою очередь, вызывает необходимость использования систем мониторинга за функционированием организма рабочего. Такая система мониторинга должна учитывать конструктивные характеристики и особенности применения экзоскелета, условия окружающей среды, характер стереотипных движений, интенсивность физической нагрузки и динамику ее изменения. В статье описан концепт системы мониторинга за функционированием организма рабочего, пригодной для применения при использовании пассивного экзоскелета, в том числе, и вальщиком леса или оператором мотокустореза, с учетом специфических особенностей окружающей их среды и физических нагрузок. Предлагаемая система мониторинга основана на использовании метода электромиографии с применением неинвазивных датчиков, датчиков уровня вибрации, измерении уровня загазованности воздуха вблизи органов дыхания рабочего и уровня шума вблизи органов слуха, а также набора оценочных средств.

Ключевые слова: экзоскелет, вальщик леса, рабочий, бензиномоторная пила, мотокусторез.

CONCEPT OF A SYSTEM FOR MONITORING THE BODY FUNCTION OF A FORESTRY WORKER

Research article

Vasilev A.^{1,*}, Sukhanov Y.²

¹ ORCID : 0000-0003-2349-5600;

² ORCID : 0000-0002-1517-5538;

^{1,2} Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russian Federation

* Corresponding author (alvas1979[at]mail.ru)

Abstract

Nowadays, with the development of engineering and technology, more and more attention is paid to the search for technical solutions to reduce fatigue of workers engaged in heavy physical labour. One of the solutions to this problem is the development of exoskeletons that absorb part of the load and reduce the effort required by the worker. Each profession, taking into account the specifics of physical movements and loads, requires an individual approach to the exoskeleton design. For example, the study of existing exoskeleton designs has shown that currently there are no industrial products designed specifically for woodcutters and motorized brush cutter operators. The development of an exoskeleton for forest workers who perform their labour duties using hand-held petrol tools requires research to evaluate the effectiveness and usability of the exoskeleton, which, in turn, necessitates the use of systems for monitoring the functioning of the worker's body. Such a monitoring system should take into account the design characteristics and features of exoskeleton use, environmental conditions, the nature of stereotypical movements, the intensity of physical activity and the dynamics of its change. The article describes the concept of a system for monitoring the functioning of the worker's body, suitable for use when using a passive exoskeleton, including a woodcutter or a motorized brush cutter operator, taking into account the specific features of their environment and physical loads. The proposed monitoring system is based on the use of electromyography method with the use of non-invasive sensors, vibration level sensors, measurement of the level of air pollution near the respiratory organs of the worker and noise level near the hearing organs, as well as a set of evaluation tools.

Keywords: exoskeleton, tree feller, worker, petrol-powered saw, motorized brush cutter.

Введение

Для оценки условий труда следует учитывать факторы трудового процесса и рабочей среды [1]. Для физического труда важнейшими факторами являются тяжесть и напряженность трудового процесса. Тяжесть процесса определяется динамическими нагрузками, массой поднимаемого груза, стереотипными движениями, позой, наклонами и перемещением в пространстве, а напряженность труда определяется интеллектуальными, сенсорными, эмоциональными нагрузками и монотонностью работы.

В настоящее время для облегчения тяжелого физического труда рабочих применяются различные приспособления. К таким приспособлениям относятся и экзоскелеты, которые по принципу работы могут быть как активными, так и пассивными. Одно из направлений использования экзоскелетов – снижение физической нагрузки на мышцы пользователя и, тем самым, снижение его утомляемости или усиление его мышечной силы.

Существуют различные профессии, связанные с физической активностью человека. Например, рабочий, осуществляющий перемещение груза по территории склада, выполняет небольшое количество однотипных движений: наклон вперед, захват груза, выпрямление спины, удержание груза в руках, перемещение к месту разгрузки, наклон вперед с грузом и его опускание, выпрямление спины без груза. Вместо наклона груз может быть оторван от опорной поверхности за счет приседания рабочего. Другой пример, работа вальщика леса, когда рабочий выполняет большое количество разнообразных движений, удержание рабочего инструмента массой 5-6 килограммов на вытянутых и согнутых руках, наклоны туловища вперед, назад, в сторону, полное приседание и полуприседание, подтягивание отпиленного от дерева куска ствола, отделенных от ствола дерева веток, перемещение по пересеченной местности.

В зависимости от вида выполняемых работ, необходимо выбирать подходящую для этого конструкцию экзоскелета. В настоящее время для выполнения однотипных операций, работниками на складских работах, активно используются экзоскелеты, но они обычно узконаправленного действия и позволяют снизить нагрузки одного вида, например, только при выпрямлении спины, при выпрямлении ног из положения сидя и т.д.

Существуют разработки экзоскелетов для людей, совершающих более сложные движения, например, для спортсменов, занимающихся бегом, горными лыжами.

Анализ условий труда рабочих, испытывающих разнообразные нагрузки, например, такие как те, что испытывает работник автосервиса [2], работник службы спасения [3], работник сельскохозяйственной сферы [4] или вальщик леса показал, что существует дефицит в технических решениях конструкций экзоскелетов для них.

Создание экзоскелета технически сложная задача, которая требует проведения мониторинга за состоянием пользователя экзоскелета с тем, чтобы получить объективную оценку эффективности его использования, основанную не только на внутреннем субъективном отзыве пользователя об изменении его самочувствия в ходе работы, но и подтвержденную объективными показаниями соответствующих систем слежения за физической утомляемостью пользователя.

При оценке эффективности применения экзоскелета для тех или иных видов физических работ следует ориентироваться на снижение показателей тяжести трудового процесса, при этом, использование работником экзоскелета, не должно приводить к повышению показателей напряженности работы из-за необходимости работника взаимодействовать с дополнительными приспособлениями.

Разработка системы слежения за активностью работы мышц рабочего и факторами среды при выполнении им трудовых обязанностей, включающая выбор мышц, за работой которых следует установить наблюдение, установление контрольных параметров, выбор подходящих для этого датчиков, представляется актуальной задачей, без решения которой невозможно оценить эффективность предлагаемой конструкции экзоскелета.

В работе [5] рассматривается роль и возможности метода поверхностной электромиографии при разработке экзоскелетов и оценке их эффективности. В своей работе авторы исследуют особенности регистрации, обработки и анализа сигналов поверхностной электромиограммы с целью использования их для управления экзоскелетом.

Существует большое разнообразие методов оценки активности работы мышц, среди которых автор работы [6] выделяет:

- оптико-электронные системы;
- электромагнитные системы;
- акселерометрические устройства;
- электромиография;
- комбинированные – сочетание нескольких методов.

К оптико-электронным системам относятся, например, системы, основанные на видеонаблюдении, использовании инфракрасных сенсоров, спекл-оптики. Данные системы могут быть основаны на использовании как активных маркеров, излучающих свет, так и пассивных, прикрепляемых к телу и отражающих свет, генерируемый в области объектива камеры, маркеров, могут быть безмаркерными. Обладают высокой точностью «захвата движения» [7]. Основные кинематические параметры, устанавливаемые данными системами: амплитуда движений, углы сгибания в суставах и сегментах тела в трех плоскостях, скорость и ускорение движения [8].

Технология «захвата движения», лежащая в основе оптико-электронных систем, нашла широкое применение в спортивной медицине при оценке физического состояния спортсменов, установления особенностей его двигательных движений, анализе механизмов возникновения травм, оценке результатов восстановительного лечения [9]. Данные системы удобны в использовании в лабораторных условиях, когда исследуемый объект располагается на относительно свободном пространстве, т.к. зачастую приходится вести съемку камерами с нескольких ракурсов, при этом размещенные на теле маркеры должны все время в прямой видимости объектива камеры. Вальщику леса приходится работать в стесненных условиях при механическом контакте с ветвями поваленных деревьев, кустарником и т.п., поэтому такие системы в нашем случае оказались непригодными.

Электромагнитные системы предполагают использование миниатюрных электромагнитов и датчика слежения. Пример использования такой системы датчиков описан в работе [10], посвященной рассмотрению проблем создания «виртуальной руки». Принцип работы данного устройства заключается в вычислении расстояния между четырьмя магнитами и датчиками, закрепленными на пальцах руки, и определению по этим данным положения кисти в пространстве.

Недостатком данной системы является то, что она позволяет определить только изменение положения изучаемого объекта в пространстве, но при этом она не позволяет измерить усилие, возникающее в мышцах при изменении положения тела в пространстве или приложении физической нагрузки.

Акселерометрические устройства нашли применение при оценке угловых скоростей и ускорений звеньев экзоскелета. В работе [11] описано применение инерциальных датчиков из гироскопов и акселерометров в каждом звене конструкции жесткого экзоскелета. В работе [12] отмечается, что использование блоков инерциальных датчиков (микромеханических гироскопов и акселерометров) нашло применение в медицине в задаче оценивания состояния звеньев экзоскелета при реабилитации больных с нарушениями функций опорно-двигательного аппарата.

Подобные системы также не полностью подходят для целей нашего исследования, поскольку позволяют только управлять движением активного жесткого экзоскелета, но она не позволяет определять величину мышечных сокращений и, следовательно, не позволяет оценивать мышечную усталость пользователя этого экзоскелета. Однако, подобные устройства могут помогать регистрировать другие вредные факторы, например, вибрацию.

Электромиография – это неинвазивный метод, основанный на использовании биоэлектрического сигнала для оценки активности работы мышц при нахождении человека в покое и выполнении двигательных действий.

Одними из главных проблем измерения биоэлектрических сигналов, в таких методах как электромиография или электрокардиография являются электромагнитные шумы от различных источников окружающей среды, а также биологические помехи из-за проблем накладывания электродов на кожу и при движении [13]. Хотя все биоэлектрические сигналы характеризуются небольшими амплитудами напряжений и невысокими частотами, однако заметно отличаются между собой, так при измерении сигналов методами электромиографии требуется регистрировать сигналы 0,1-10 мВ с частотой 20–10000 Гц, а при измерении сигналов методами электрокардиографии требуется регистрировать сигналы 0,5-4 мВ с частотой 0,01–250 Гц, но на практике регистрируют сигналы в более узком диапазоне [14].

Электромиография может осуществляться двумя способами. Первый способ заключается в использовании электродов, устанавливаемых надкожно над двигательной точкой мышцы и передающих сигнал на электромиограф, который его обрабатывает (поверхностная электромиография, sEMG). При втором способе используются игольчатые электроды, которые вводятся в мышцу. И в первом и втором способе улавливаемые электродами изменения потенциалов регистрирует осциллограф. Полученные данные могут выводиться как на бумажный носитель, магнитный носитель, так и визуализироваться на экране монитора [9].

Если ранее для регистрации биоэлектрических сигналов широко использовались влажные электроды из серебра или нержавеющей стали, то сейчас новые технологии позволяют произвести переход к различным типам сухих электродов без геля, включая текстильные электроды с использованием графена, металлизированных или полимерных покрытий, для задач, связанных с портативным мониторингом за здоровьем людей в повседневной жизни [15]. Аналогичные работы проводят с сухими электродами из пленок титана на подложках из полиуретана и нержавеющей стали для регистрации sEMG сигналов [16].

В работе [17] описывается возможность применения беспроводной системы регистрации и анализа электромиографической активности мышц человека для интеллектуального ассистирования пациентам с моторными нарушениями. Подобные беспроводные системы мобильного миографа нашли свое применение в том числе и в целях функциональной диагностики при медицинской реабилитации пациентов.

В работе [18] рассматриваются методы исследования безопасности и эффективности применения промышленных экзоскелетов. Отмечается, что существуют различные системы мониторинга за функциональным состоянием:

- «захват движения». При этом наиболее рациональным методом оценки биомеханики движения в суставах является использование инерциальных датчиков;

- эргосперометрия. Метод комплексной оценки биоэлектрической активности мышц;
- электромиография
- миотонометрия. Метод оценки мышечного тонуса;
- динамометрия;
- стабиллометрия;
- проведение функциональных проб;
- психофизиологическое тестирование;
- интервьюирование;
- анкетирование.

В этой же работе авторы отмечают, что безопасность применения промышленных экзоскелетов оценивалась по: динамике показателей общего состояния испытуемых, и степени ограничения амплитуд активных движений в крупных суставах конечностей и сочленениях позвоночного столба, а физиологическая эффективность применения экзоскелетов оценивалась по: динамике уровня энергозатрат за время трудовой деятельности, показателям кардиореспираторной системы, утомлению скелетной мускулатуры, участвующей в выполнении трудовых движений и поддержании рабочих поз, показателя статической координации, показателя субъективных ощущений и психофизиологического состояния испытуемых, показателям производительности труда.

Методы и принципы исследования

Объект исследования: рабочий, выполняющий физически тяжелый труд.

Предмет исследования: система мониторинга за функционированием организма рабочего.

Цель: разработка системы мониторинга за функционированием организма рабочего при тяжелом физическом труде с использованием экзоскелета и без такового.

Задачи:

1) изучить методы оценки физического состояния организма человека, занимающегося тяжелым физическим трудом;

2) выбрать параметры физического состояния, подлежащие контролю;

3) выбрать систему датчиков и регистрирующее устройство;

4) предложить метод мониторинга за функционированием организма рабочего при тяжелом физическом труде.

Для достижения поставленной цели и решения поставленных задач использовались методы:

– поиска и анализа научной и технической литературы;

– метод сравнения;

– метод функционально-структурно-технологического анализа;

– метод мозгового штурма.

Основные результаты

Для исследований тяжести и напряженности труда было разработано устройство с набором датчиков, позволяющий оценить физиологические показатели организма и факторов среды на рабочем месте.

Тяжелый физический труд требует напряжения мышц работника. Активность мышц рабочего при работе удобнее всего определять по поверхностной электромиографии (ЭМГ, sEMG). Оценку физических нагрузок на вальщика леса было решено определять по четырехглавой мышце бедра, работающей при разгибании ноги в колене, и двуглавой мышце плеча, работающей при сгибании руку в локтевом и плечевом суставах. Доступные и хорошо документированные модули для регистрации электромиографических сигналов выполняют на базе высококачественных инструментальных усилителей, например, на AD8226.

Известно, что во время тяжелой физической работы меняется тепловое состояние рабочего, образование тепла в организме увеличивается, что ведет к повышению температуры на поверхности кожи, поэтому было решено дополнительно разместить на конечностях и туловище вальщика датчики температуры для косвенной оценки интенсивности физической работы. Знание диапазона колебаний температуры необходимо для обоснованного выбора материала пассивного экзоскелета, чтобы обеспечить благоприятный уровень терморегуляции вальщика леса. В качестве доступных сенсоров температуры удобно применять цифровые датчики DS18B20, работающие по интерфейсу 1-Wire.

Интенсивность физической активности организма и то, как организм конкретного человека переносит определенную нагрузку можно оценить по частоте пульса, поэтому в систему мониторинга был включен соответствующий датчик, определяющий частоту пульса. Для данной задачи удобно применять доступные портативные модули на базе микросхемы MAX30102, которая позволяет осуществлять измерение пульса и уровень насыщения крови кислородом.

Особенностью работы вальщика является наличие в руках рабочего инструмента, создающего значительное вибрационное воздействие. В связи с этим потребовалось предусмотреть установку на запястьях рабочего датчиков, фиксирующих местный уровень вибраций. Выбор места установки элементов системы мониторинга диктовался тем, чтобы они не мешали работе, что необходимо для обеспечения безопасных условий труда и при этом были скрыты под одеждой, что позволит обеспечить их целостность и защитить от прямого механического воздействия посторонними предметами окружающей среды, такими как ветви, сучья, подрост т. п. В качестве датчиков вибраций возможно применить доступные микроэлектромеханические датчики, например, MPU6050, объединяющие в одном корпусе гироскоп и акселерометр.

Для оценки условий труда вальщика было решено зафиксировать уровень шумового воздействия на органы слуха и уровень загрязнения воздуха выхлопными газами бензиномоторной пилы вблизи органов дыхания рабочего.

Для измерения уровня шумового воздействия было решено установить на воротнике одежды вальщика конденсаторный микрофон, сигнал с которого усиливается усилителем низкой частоты. Для оценки уровня содержания во вдыхаемом вальщиком воздухе вредных газов было решено установить на уровне шеи датчик угарного и горючих газов MQ-9.

Для сбора данных с датчиков выбрана микропроцессорная платформа Arduino MEGA, которая собирает данные, предварительно обрабатывает и записывает информацию в текстовый файл на micro-SD карту через модуль расширения.

Схема расположения датчиков на теле рабочего приведена на рисунке 1.

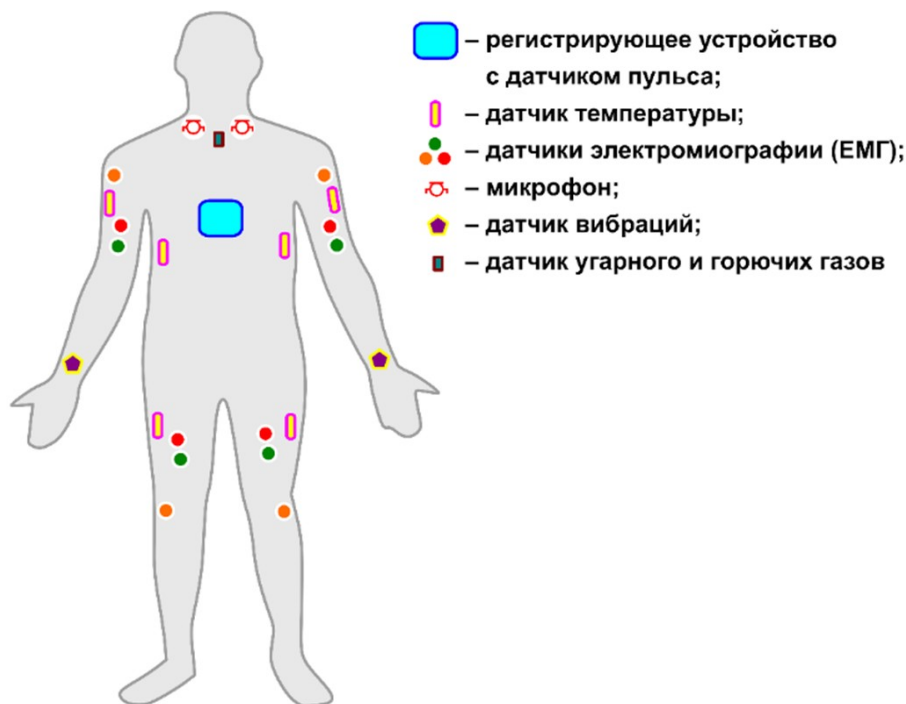


Рисунок 1 - Расположение датчиков и регистрирующего устройства на теле рабочего
DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.39.6.1>

В настоящее время произведено тестирование работоспособности отдельных датчиков и ведется работа по созданию конструкции единого устройства для регистрации параметров тяжести и напряженности труда, который будет удобен для навешивания на вальщика леса или оператора мотокустореза, не будет стеснять их движения и мешать выполнению основной трудовой деятельности.

Кроме оценки тяжести труда следует оценивать и напряженность труда, которая также значительно влияет на утомляемость. Известно, что утомляемость человека во многом зависит от его психоэмоционального состояния, поэтому в дополнение к информации, собираемой посредством датчиков, устанавливаемых на теле рабочего, система мониторинга включает в себя проведение психофизиологического тестирования, интервьюирования и анкетирования. С этой целью были разработаны специальные оценочные средства в виде тестов, опросников, анкет.

Заключение

Облегчить условия труда, снизить физическую утомляемость рабочего, выполняющего тяжелую физическую работу с использованием бензомоторного инструмента, в том числе оператора бензомоторной пилы или мотокустореза, можно за счет использования экзоскелета. Снижение утомляемости в свою очередь будет способствовать более высокой концентрации внимания и, за счет этого, приведет к снижению травматизма.

Проведенное исследование в отношении конструкций экзоскелетов показало, что в лесной отрасли наблюдается дефицит технических решений в данной области, ориентированных на работающих в лесу с использованием бензомоторного инструмента рабочих.

Разработка экзоскелета вальщика связана с рядом сложностей, которые обусловлены большим количеством мышц, задействованных в работе на лесосеке, проведением работ, как с инструментами в руках, так и без него, работой в стесненных условиях, особенно при обрезке сучьев с поваленных деревьев, расположением рабочего места вдали от источников электроэнергии, нахождением на открытом воздухе под воздействием природных осадков, дневных колебаний температур и т.п. то же самое касается и операторов мотокусторезов.

В ходе проведенного исследования был разработан концепт системы мониторинга за функциональным состоянием вальщика леса и оператора мотокустореза во время выполнения трудовых обязанностей. Предлагаемая система разрабатывается с учетом возможности ее применения при оценке эффективности работы пассивного экзоскелета. Данные, собранные посредством такой системы, будут использованы при обосновании необходимой жесткости и упругих свойств конструктивных элементов экзоскелета с учетом индивидуальных нагрузок на отдельные мышцы и суставы рабочего.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Р 2.2.2006-05: Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. — введ. 2005-11-01.
2. Van der Vorm J. Safety and Risk Management in Designing for the Lifecycle of an Exoskeleton: A Novel Process Developed in the Robo-Mate Project / J. Van der Vorm, R. Nugent, L. O'Sullivan // *Procedia Manufacturing*. — 2015. — 3. — p. 1410-1417. — DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.304.
3. Osipov A. Fire Exoskeleton to Facilitate the Work of the Fireman / A. Osipov // *E3S Web of Conferences*. — 2019. — 126. — DOI: 10.1051/e3sconf/201912600015.
4. Borisov A.V. Simulation of the Motion of Agricultural Worker in a Passive Exoskeleton with Two Types Spring Elements when Performing Work with Higher Physical Loads / A.V. Borisov, L.V. Konchina, M.G. Kulikova et al. // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. — 2021. — 723. — DOI: 10.1088/1755-1315/723/3/032063.
5. Рукина Н.Н. Метод поверхностной электромиографии: роль и возможности при разработке экзоскелета (обзор) / Н.Н. Рукина, А.Н. Кузнецов, В.В. Борзиков и др. // *Современные технологии в медицине*. — 2016. — 8-2. — с. 109-118. — DOI: 10.17691/stm2016.8.2.15.
6. Котов А.М. Поверхностная ЭМГ: применимость в биомеханическом анализе движений и возможности для практической реабилитации / А.М. Котов, А.Е. Хижникова, А.С. Клочков и др. // *Физиология человека*. — 2021. — 47-2. — с. 122-134. — DOI: 10.31857/S0131164621020041.
7. Белова А.Н. Возможность современных технологий биомеханического анализа движений в изучении механизмов спортивных травм (обзор) / А.Н. Белова, Н.Н. Рукина, А.Н. Кузнецов и др. // *Российский журнал биомеханики*. — 2022. — 2. — с. 74-86. — DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2022.2.07.
8. Аксенов Ю. Методология видеонализа в диагностике нарушений локомоторной функции у детей с церебральным параличом / Ю. Аксенов, Г.Х. Хит, Т.А. Клишковская и др. // *Гений ортопедии*. — 2019. — 25-1. — с. 102-110. — DOI: 10.18019/1028-4427-2019-25-1-102-110.
9. Хитров М.В. Электромиография как метод объективизации результатов физической реабилитации травм опорно-двигательного аппарата спортсменов. / М.В. Хитров, Т.И. Субботина, А.А. Яшин // *Известия ТулГУ. Гуманитарные науки*. — 2012. — 1-2. — С. 3-8.
10. Ведется разработка системы электромагнитных датчиков для «виртуальной руки» [Электронный ресурс] // Портал «Научная Россия». — 2015. — URL: <https://scientificrussia.ru/articles/vedetsya-razrabotka-ustrojstva-virtualnoj-ruki>. (дата обращения: 14.09.23)
11. Lora-Millan J. S. An IMUs-Based Extended Kalman Filter to Estimate Gait Lower Limb Sagittal Kinematics for the Control of Wearable Robotic Devices / J. S. Lora-Millan, A.F. Hidalgo, E. Rocon // *IEEE Access*. — 2021. — 9. — p. 1-1. — DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3122160.
12. Сайпулаев Г. Р. Применение блока инерциальных датчиков для оценивания положения и управления движением экзоскелета нижних конечностей / Г. Р. Сайпулаев, М. Р. Сайпулаев, И. В. Меркурьев и др. // *Advanced Engineering Research*. — 2022. — 3. — с. 204-213. — DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-3-204-213.
13. Thakor Nitish V. Biopotentials and Electrophysiology Measurement / V. Thakor Nitish // *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. Electromagnetic, Optical, Radiation, Chemical, and Biomedical Measurement* / Ed. by J.G. Webster, H. Eren. — CRC Press, 1999. — 20 p.
14. Jair Alves Mendes Júnior J. AD8232 to Biopotentials Sensors: Open Source Project and Benchmark / J. Jair Alves Mendes Júnior, L. Coelho de Andrade Villela De Biassio, P. Carlin Passos et al. — 2023 — URL: https://www.researchgate.net/publication/368369646_AD8232_to_Biopotentials_Sensors_Open_Source_Project_and_Benchmark (accessed: 16.09.2023) — DOI: 10.3390/electronics12040833.
15. Vidhya C.M. Electrodes for Wearable Biopotential Signal Monitoring: A Comprehensive Review. *Biosensors* / C.M. Vidhya, Y. Maithani, J.P. Singh. — 2023 — URL: https://www.researchgate.net/publication/371935828_Recent_Advances_and_Challenges_in_Textile_Electrodes_for_Wearable_Biopotential_Signal_Monitoring_A_Comprehensive_Review (accessed: 16.09.2023) — DOI: 10.3390/bios13070679.
16. Rodrigues M.S. ry Electrodes for Surface Electromyography Based on Architected Titanium Thin Films / M.S. Rodrigues, P. Fiedler, N. Küchler et al. // *Materials (Basel)*. — 2020. — 13(9). — DOI: 10.3390/ma13092135.
17. Хоружко М. А. Мобильная система управления экзоскелетом с помощью электромиографических сигналов мышц человека / М. А. Хоружко, Г. Н. Сесекин, Н. В. Болдырева и др. // *Современные технологии в медицине*. — 2017. — 9-4. — с. 162-169. — DOI: 10.17691/stm2017.9.4.20.
18. Гергей А.М. Современные методы исследования безопасности и физиологической эффективности применения промышленных экзоскелетов / А. М. Гергей, Е. С. Шитова, И. С. Малахова и др. // *Анализ риска здоровью*. — 2020. — 3. — с. 148-159. — DOI: 10.21668/health.risk/2020.3.18.

Список литературы на английском языке / References in English

1. R 2.2.2006-05: Rukovodstvo po gigenicheskoj ocenke faktorov rabochej sredy i trudovogo processa. Kriterii i klassifikacija uslovij truda [P 2.2.2006-05: Guide on Hygienic Assessment of Factors of Working Environment and Work Load. Criteria and Classification of Working Conditions]. — introduction 2005-11-01. [in Russian]
2. Van der Vorm J. Safety and Risk Management in Designing for the Lifecycle of an Exoskeleton: A Novel Process Developed in the Robo-Mate Project / J. Van der Vorm, R. Nugent, L. O'Sullivan // *Procedia Manufacturing*. — 2015. — 3. — p. 1410-1417. — DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.304.
3. Osipov A. Fire Exoskeleton to Facilitate the Work of the Fireman / A. Osipov // *E3S Web of Conferences*. — 2019. — 126. — DOI: 10.1051/e3sconf/201912600015.

4. Borisov A.V. Simulation of the Motion of Agricultural Worker in a Passive Exoskeleton with Two Types Spring Elements when Performing Work with Higher Physical Loads / A.V. Borisov, L.V. Konchina, M.G. Kulikova et al. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — 723. — DOI: 10.1088/1755-1315/723/3/032063.
5. Rukina N.N. Metod poverhnostnoj elektromiografii: rol' i vozmozhnosti pri razrabotke ekzoskeleta (obzor) [Surface Electromyography: its Role and Potential in the Development of Exoskeleton (Review)] / N.N. Rukina, A.N. Kuznetsov, V.V. Borzikov et al. // Modern Technologies in Medicine. — 2016. — 8-2. — p. 109-118. — DOI: 10.17691/stm2016.8.2.15. [in Russian]
6. Kotov A.M. Poverhnostnaja EMG: primenimost' v biomehanicheskom analize dvizhenij i vozmozhnosti dlja prakticheskoj reabilitatsii [Surface Emg: Applicability in the Motion Analysis and Opportunities for Practical Rehabilitation] / A.M. Kotov, A.E. Hizhnikova, A.S. Klochkov et al. // Human Physiology. — 2021. — 47-2. — p. 122-134. — DOI: 10.31857/S0131164621020041. [in Russian]
7. Belova A.N. Vozmozhnosti sovremennyh tehnologij biomehanicheskogo analiza dvizhenij v izuchenii mehanizmov sportivnyh travm (obzor) [State-of-the-art Possibilities of Motion Capture Technologies in Sport Injuries Research (review)] / A.N. Belova, N.N. Rukina, A.N. Kuznetsov et al. // Russian Journal of Biomechanics. — 2022. — 2. — p. 74-86. — DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2022.2.07. [in Russian]
8. Aksenov Ju. Metodologija videoanaliza v diagnostike narushenij lokomotornoj funktsii u detej s tserebral'nym paralizom [Optimising Video-based Data Capture for Pathological Gait Analysis in Children with Cerebral Palsy Using a Limited Number of Retro-reflective Cameras (literature review)] / Ju. Aksenov, G.H. Hit, T.A. Kliskovskaja et al. // Orthopedic Genius. — 2019. — 25-1. — p. 102-110. — DOI: 10.18019/1028-4427-2019-25-1-102-110. [in Russian]
9. Xitrov M.V. E'lektromiografiya kak metod ob'ektivizacii rezul'tatov fizicheskoj reabilitacii travm oporno-dvigatel'nogo apparata sportsmenov [Electromyography as a Method of Objectification of Physical Rehabilitation Results of Locomotor Apparatus Sportsmens Traumas]. / M.V. Xitrov, T.I. Subbotina, A.A. Yashin // News of Tula State University. Humanitarian Sciences. — 2012. — 1-2. — P. 3-8. [in Russian]
10. Vedetsya razrabotka sistemy' e'lektromagnitny'x datchikov dlya «virtual'noj ruki» [A System of Electromagnetic Sensors for a “Virtual Hand” is Being Developed] [Electronic source] // Portal "Scientific Russia". — 2015. — URL: <https://scientificrussia.ru/articles/vedetsya-razrabotka-ustrojstva-virtualnoj-ruki>. (accessed: 14.09.23) [in Russian]
11. Lora-Millan J. S. An IMUs-Based Extended Kalman Filter to Estimate Gait Lower Limb Sagittal Kinematics for the Control of Wearable Robotic Devices / J. S. Lora-Millan, A.F. Hidalgo, E. Rocon // IEEE Access. — 2021. — 9. — p. 1-1. — DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3122160.
12. Sajpulaev G. R. Primenenie bloka inertsiyal'nyh datchikov dlja otsenivaniya polozhenija i upravlenija dvizheniem ekzoskeleta nizhnih konechnostej [Application of an Inertial Sensor Unit for Position Estimation and Motion Control of the Lower-Extremity Powered Exoskeleton] / G. R. Sajpulaev, M. R. Sajpulaev, I. V. Merkur'ev et al. // Advanced Engineering Research. — 2022. — 3. — p. 204-213. — DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-3-204-213. [in Russian]
13. Thakor Nitish V. Biopotentials and Electrophysiology Measurement / V. Thakor Nitish // Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. Electromagnetic, Optical, Radiation, Chemical, and Biomedical Measurement / Ed. by J.G. Webster, H. Eren. — CRC Press, 1999. — 20 p.
14. Jair Alves Mendes Júnior J. AD8232 to Biopotentials Sensors: Open Source Project and Benchmark / J. Jair Alves Mendes Júnior, L. Coelho de Andrade Villela De Biassio, P. Carlin Passos et al. — 2023 — URL: https://www.researchgate.net/publication/368369646_AD8232_to_Biopotentials_Sensors_Open_Source_Project_and_Benchmark (accessed: 16.09.2023) — DOI: 10.3390/electronics12040833.
15. Vidhya C.M. Electrodes for Wearable Biopotential Signal Monitoring: A Comprehensive Review. Biosensors / C.M. Vidhya, Y. Maithani, J.P. Singh. — 2023 — URL: https://www.researchgate.net/publication/371935828_Recent_Advances_and_Challenges_in_Textile_Electrodes_for_Wearable_Biopotential_Signal_Monitoring_A_Comprehensive_Review (accessed: 16.09.2023) — DOI: 10.3390/bios13070679.
16. Rodrigues M.S. ry Electrodes for Surface Electromyography Based on Architected Titanium Thin Films / M.S. Rodrigues, P. Fiedler, N. Küchler et al. // Materials (Basel). — 2020. — 13(9). — DOI: 10.3390/ma13092135.
17. Horuzhko M. A. Mobil'naja sistema upravlenija ekzoskeletom s pomosh'ju elektromiograficheskikh signalov myshts cheloveka [A Mobile Exoskeleton Control System Using Electromyographic Signals from Human Muscles] / M. A. Horuzhko, G. N. Sesekin, N. V. Boldyreva et al. // Modern Technologies in Medicine. — 2017. — 9-4. — p. 162-169. — DOI: 10.17691/stm2017.9.4.20. [in Russian]
18. Geregej A. M. Sovremennye metody issledovaniya bezopasnosti i fiziologicheskoy effektivnosti primenenija promyshlennyh ekzoskeletov [Up-to-date Techniques for Examining Safety and Physiological Efficiency of Industrial Exoskeletons] / A. M. Geregej, E. S. Shitova, I. S. Malahova et al. // Health Risk Analysis. — 2020. — 3. — p. 148-159. — DOI: 10.21668/health.risk/2020.3.18. [in Russian]