

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-78-97>



УДК 613.6:613.6.027

## Применение ЭМГ для оценки эффективности и безопасности промышленного экзоскелета в трудовой деятельности

А. С. Яцун<sup>1</sup>, М. П. Щербакова<sup>1</sup>✉, А. В. Мальчиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: 5-storm-7@mail.ru

### Резюме

**Целью исследования** является оценка эффективности и безопасности применения промышленного экзоскелета при помощи ЭМГ в условиях моделирования трудовой деятельности.

**Методы.** Руководствуясь ГОСТ Р 60.5.3.3-2023 и национальным стандартом РФ ГОСТ Р 60.5.2.1-2023, использованы неинвазивная методика общей оценки состояния кардиореспираторной системы человека, электромиография как ключевой способ оценки биоэлектрической активности мышц, а также проведение интервью с участниками исследований.

**Результаты.** Полученные в ходе исследования с использованием избранных методов данные продемонстрировали существенные различия между зафиксированными показателями участников, выполнявших задания без ПЭ и с его использованием.

Были получены следующие результаты: во время переноса груза активность локтевого сгибателя запястья при использовании ПЭ снижалась в среднем на 41%, бицепса – на 21%; во время удержания груза активность локтевого сгибателя запястья при использовании ПЭ снижалась в среднем на 42%, бицепса – на 52%.

Эксперименты на выносливость показали снижение активности мышц на 52–42% при использовании ПЭ, что положительно влияет продолжительность комфортной работы, которая увеличилась в среднем в 2,5 раза. Также общее физиологическое состояние участников (пульс, давление, сатурация) при использовании ПЭ было ближе к стандартам, чем без ПЭ.

Согласно ответам участников, все замечали небольшую разницу в пользу использования ПЭ. Особенно заметна помощь ПЭ после ряда выполненных подходов.

**Заключение.** Проведённое в рамках работы исследование для определения эффективности и безопасности применения ПЭ в процессе трудовой деятельности, в том числе и для нивелирования вреда от стереотипных рабочих движений, показало снижение активности измеряемых мышц при использовании ПЭ, что также говорит о снижении утомляемости человека, чем повышает эффективность его работы.

**Ключевые слова:** промышленный экзоскелет; плечевой отдел; активность мышц; работа по перемещению / удержанию груза; рабочие движения; эффективность и безопасность; электромиография.

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках гранта РНФ «Поиск и теоретическое обоснование новых моделей, алгоритмов и средств создания биотехнических систем на основе “мягких” экзоскелетов» (Соглашение № 23-29-00823).

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

**Для цитирования:** Яцун А. С., Щербакова М. П., Мальчиков А. В. Применение ЭМГ для оценки эффективности и безопасности промышленного экзоскелета в трудовой деятельности // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 4. С. 78–97. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-14-4-78-97>

Поступила в редакцию 08.10.2024

Подписана в печать 07.11.2024

Опубликована 27.12.2024

## The use of EMG to assess the effectiveness and safety of an industrial exoskeleton in the workplace

Andrey S. Yatsun<sup>1</sup>, Maria P. Shcherbakova<sup>1</sup> ✉, Andrei V. Malchikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: 5-storm-7@mail.ru

### Abstract

**The purpose of research** the work is to evaluate the effectiveness and safety of the use of an industrial exoskeleton using EMG in the conditions of modeling labor activity.

**Methods.** Guided by GOST R 60.5.3.3-2023 and the national standard of the Russian Federation GOST R 60.5.2.1-2023, a non-invasive technique for the general assessment of the human cardiorespiratory system, electromyography as a key way to assess the bioelectric activity of muscles, as well as conducting interviews with research participants were used.

**Results.** The data obtained as a result of the study using the selected methods showed significant differences between the registered values of the indicators of volunteers who worked without PE and with its use.

The following results were obtained: during load transfer, the activity of the elbow flexor of the wrist when using IE decreased by an average of 41%, biceps – by 21%; during load retention, the activity of the elbow flexor of the wrist when using IE decreased by an average of 42%, biceps – by 52%.

Endurance experiments showed a 52-42% decrease in muscle activity when using IE, which positively affects the duration of comfortable work, which increased by an average of 2.5 times.

Also, the general physiological condition of the volunteers (pulse, pressure, saturation) when using IE was closer to the standards than without IE.

According to the responses of the volunteers, everyone noticed a slight difference in favor of using IE. IE's help is especially noticeable after a number of completed approaches.

**Conclusion.** A study conducted within the framework of the work to determine the effectiveness and safety of the use of PE in the course of work, including to offset the harm from stereotypical work movements, showed a decrease in the activity of the measured muscles when using PE, which also indicates a decrease in human fatigue, which increases the efficiency of his work.

**Keywords:** industrial exoskeleton; shoulder section; muscle activity; work on moving / holding cargo; working movements; efficiency and safety; electromyography.

**Conflict of interest:** The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Yatsun A.S., Shcherbakova M.P., Malchikov A.V. The use of EMG to assess the effectiveness and safety of an industrial exoskeleton in the workplace. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(4):78–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-78-97>

Received 08.10.2024

Accepted 07.11.2024

Published 27.12.2024

## Введение

По данным Росстата, в последние пару лет в России порядка 20,1% занятых официально трудятся на тяжелых работах<sup>1</sup>. Несмотря на то, что в настоящее время количество ручного труда, в т. ч. и на тяжёлых производствах, имеет тенденцию на сокращение, в различных отраслях экономики без тяжелого физического труда всё ещё не обойтись. Соответственно физическая нагрузка продолжает оставаться ключевым фактором риска получения травм и развития профессиональных заболеваний, включая патологии опорно-двигательного аппарата [1].

Из-за тяжёлого физического труда работник постоянно подвергается воздействию высоких нагрузок, вследствие чего устаёт, теряет бдительность на фоне усталости и зачастую допускает ошибки, которые могут привести к травматизации в несчастном случае.

По данным Росстата, треть несчастных случаев (порядка 31,2%) фиксируют на предприятиях обрабатывающего производства, которые включают в себя заводы и фабрики, где работники трудятся в цехах. 15% травм приходится на работников в сфере транспортировки и хранения, зачастую это связано с погрузочно-разгрузочными работами и транспортными происшествиями. Около 9,1% производственных несчастных случаев приходится на строительство<sup>1</sup>.

Наиболее верным подходом, безусловно, является подход по предупреждению возникновения ситуаций, которые могут приводить к различного рода травмам, но не стоит исключать ситуации, когда предупреждающие меры уже бессильны. В связи с этим проводились направленные в медицинскую сторону исследования. Например, проведённое в 2024 г. исследование группой учёных из разных стран, целью которого было выяснить, насколько хорошо носимый пассивный экзоскелет влияет на координацию движений у пациентов с мозжечковой атаксией. Результатами данного исследования стали: уменьшение медиально-бокового отклонения центра масс, более эффективное поведение тела в передне-заднем направлении, оптимизация расхода энергии, уменьшение коактивации мышц и лучшая координация между активациями мышц [2].

Возвращаясь к промышленности, стоит отметить, что профессиональные заболевания, вызванные физическими перегрузками и переутомлением определенных органов и систем, занимают вторую позицию среди профессиональных патологий в зависимости от воздействия вредных производственных факторов и составляют около 25% [3]. Зачастую страдает поясничный и плечевой отделы, боли в которых могут вызываться различными причинами [4]. Однако в 90% случаев боль связана с заболеваниями

---

<sup>1</sup> Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 25.09.2024).

позвоночника и мышц спины. Заболевания, возникающие вследствие физической работы и стереотипных (повторяющихся) движений, неизбежны в любой деятельности, связанной с перемещением грузов (Р 2.2.2006-05. Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда).

На основании представленной статистики одним из наиболее актуальных направлений является разработка промышленных экзоскелетов, способных защищать верхние отделы опорно-двигательного аппарата человека от избыточных физических нагрузок [5]. Также значительно снизить риск осложнений от стереотипных движений. В дополнение стоит отметить, что здоровье населения, особенно трудоспособного возраста, положительно повлияет на экономику страны [6].

Медико-биологическая оценка ПЭ имеет важное значение при формировании выводов о их безопасности и физиологической эффективности [7]. Современные подходы к изучению функционального состояния человека, используемые в таких сферах, как медицина труда, спортивная медицина [8], функциональная диагностика, реабилитация и другие области, позволили выбрать следующие методы для данного исследования:

– измерение ключевых биологических параметров как неинвазивный способ комплексной оценки состояния сердечно-легочной системы человека [9];

– электромиография (ЭМГ), являющаяся основным методом изучения биоэлектрической активности мышц [10].

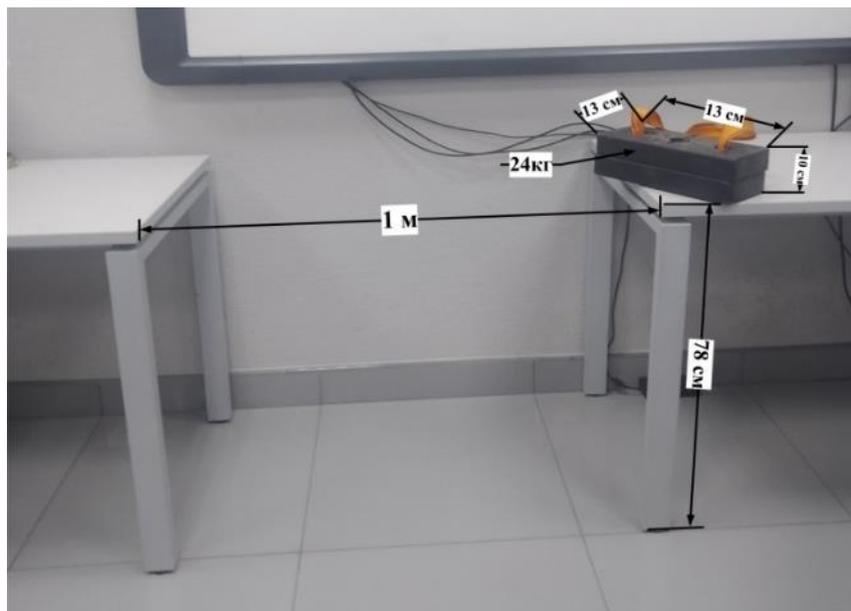
Исходя из сложившейся проблемы данное исследование заключается в оценке безопасности и эффективности использования промышленного экзоскелета в условиях, имитирующих трудовую деятельность, включая выполнение повторяющихся рабочих движений [11].

### Материалы и методы

Модель трудовой деятельности была разработана в лабораторных условиях ФГБОУ ЮЗГУ НИЛ «МиР». В основу разработки модели легли показатели тяжести трудовых процессов, а также характеристики рабочих поз и повторяющихся движений, связанных с ручным перемещением и удержанием груза [12]. Условия для моделирования рабочей среды были созданы максимально приближенными к реальным условиям, в которых специалисты выполняют реальные задачи, связанные с перемещением грузов исключительно при помощи только собственной мускульной силы [13].

Рассмотрим модель рабочего места в лабораторных условиях (рис. 1).

Испытываемым образцом являлся промышленный экзоскелет Holdupper (рис. 2), обеспечивающий снижение физических нагрузок на человека и позволяющий улучшить условия труда, снизить травмоопасность и утомляемость при работах с тяжелым ручным инструментом, поднятии, удержании и переносе грузов верхними конечностями [14].



**Рис. 1.** Модель рабочего места в лабораторных условиях

**Fig. 1.** Workplace model in laboratory conditions



**Рис. 2.** Общий вид тестируемого экзоскелета

**Fig. 2.** General view of the exoskeleton under test

Предназначен для поднятия и переноса грузов на высоте от 0,8 до 1,6 м и разгрузки верхних конечностей, а также плечевого пояса оператора [15].

Для участия в исследовании было приглашено пять участников (добровольцев) из числа молодых и здоровых мужчин в возрасте  $20 \pm 1$  год со следующими

показателями: рост  $180,0 \pm 5$  см; массой тела  $81,0 \pm 10,5$  кг; индекс массы тела в диапазоне 23–26,7.

Все они прошли медицинские осмотры, подтвердившие отсутствие у них каких-либо заболеваний. Каждый участник моделировал трудовую деятельность как с применением промышленного экзоскелета, так и без него.

Для определения безопасности применения ПЭ как первостепенно важного фактора отслеживалось и оценивалось общее состояние участников посредством визуального осмотра, измерения базовых показателей функционального состояния и проведения интервью (оценки по 10-балльной шкале).

Интервью включало субъективную оценку ощущений во время выполнения движений в поясничной и плечевой зонах, самооценку физического состояния и уровня работоспособности, а также наличие неприятных или болезненных ощущений. Интервьюирование для случаев использования ПЭ включало специальные вопросы, оценивающие следующие параметры [1]:

- оценка самочувствия в сравнении с самочувствием перед началом эксперимента;
- оценка комфортности работы в ПЭ в сравнении с работой без использования ПЭ;
- оценка удобства использования ПЭ во время выполняемой работы;
- оценка удобства использования ПЭ во время отдыха или выполнения операций, отличных от рабочих;
- оценка комфорта и скорости надевания и снятия ПЭ;

– оценка скорости привыкания к использованию ПЭ.

Для определения эффективности использования ПЭ как второстепенно важного фактора оценивались следующие параметры [1]:

- общее состояние участников;
- уровень усталости и психофизиологическое состояние участников на протяжении всего периода моделирования трудовой деятельности (оценка давалась самими участниками);
- показатели кардиореспираторной системы участников;
- утомляемость мышц, задействованных в выполнении рабочих движений;
- показатели координации участников (как статической, так и динамической);
- показателям производительности труда (в рамках теста на продолжительность комфортной работы по удержанию груза на вытянутых вперед руках с использованием ПЭ и без него).

Активность и утомление мускулатуры оценивали путем проведения ЭМГ, с помощью электромиографической системы Callibri Muscle Tracker. Основные характеристики используемого ЭМГ датчика представлены ниже (табл. 1).

Чтобы оценить физиологическое состояние участника и влияние на него экзоскелета в ходе моделирования трудовой деятельности, использовался многопараметрический монитор пациента (серия KN-601M), основные характеристики которого представлены ниже (табл. 2).

**Таблица 1.** Характеристики используемых датчиков ЭМГ [16]**Table 1.** Characteristics of the EMG sensors used [16]

Параметр	Значение
Анализ повторяющихся во времени движений	да
Описание движений набором параметров	$A_{cp}$ , $A_{max}$ , $T_{cp}$ , $v$ , $S$
Анализ ритмичности повторений и изменения мощности движений во время активности	Да
Расчёт интегральной ЭМГ	Да
Конфигурация каналов с возможностью выбора места наложения	Да
Мониторинг мгновенного значения ЧСС с построением истории изменения этого показателя	Да
Автоматическая система обнаружения участков активности ЭМГ	Да
Количество одновременно используемых датчиков	До 4
Тип регистрации потенциалов	Биполярный
Беспроводной интерфейс связи	Да
Регистрируемые сигналы	ЭМГ
Диапазон измеряемых напряжений ЭМГ	0–2,4 В
Дальность работы канала беспроводной связи	до 2–5 м
Частота работы	2,4 ГГц
Установка	Самоклеящиеся электроды

**Таблица 2.** Характеристики используемого монитора пациента**Table 2.** Characteristics of the patient monitor used

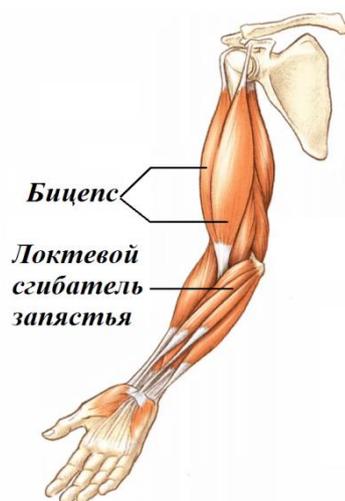
Параметр	Значение
Режимы работы	Мониторинг, измерение, диагностика
Отображаемые параметры	ЭКГ (2 канала)
	NIBP
	ЧСС
	ЧД
	SpO <sub>2</sub> (сатурация)
	Температура тела
	Плетизмограмма
Респираграмма	
Фиксация графиков на экране	Да

*Примечание.* Составлено на основании следующих данных: Colposcopes, video colposcopes, UVB lamps, excimer lasers, photodynamic devices, ets. URL: <https://kernel.nt-rt.ru/> (дата обращения: 25.09.2024).

Также были задействованы хронометрическое устройство для соблюдения таймингов выполнения работы,

камера для регистрации хода выполнения экспериментов и средства обработки полученных данных.

При исследовании физиологической эффективности ПЭ оценивали состояние мышц спины в плечевом отделе (бицепс и локтевой сгибатель запястья на обеих руках) (рис. 3, а) для четырёх состояний участника (рис. 4).



а

На рисунке 3, б представлен пример размещения ЭМГ датчиков на участнике для регистрации активности исследуемых мышц.



б

**Рис. 3.** Схема расположения датчиков регистрации активности мышц: а – расположение и крепление широчайших мышц; б – расположение датчиков на участнике (левая сторона): 1 – область установки датчика на бицепс; 2 – область установки датчика

**Fig. 3.** The layout of the sensors for registering muscle activity: а – the location and attachment of the widest muscles; б – the location of the sensors on the volunteer (left side): 1 – the area of installation of the sensor on the biceps; 2 – the area of installation of the sensor on the elbow flexors of the wrist

Область данного расположения датчиков обусловлена тем, что при выполнении любой работы по перемещению груза верхние конечности (бицепс и локтевой сгибатель запястья) всегда задействованы и принимают на себя большую нагрузку [17]. Также важно принимать во внимание то, что во время работы верхними конечностями происходит вовлечение вторичных мышц рук, плечевого и грудного отделов [17], которые работают вместе, и при нарушении работы исследуемых мышц большая часть нагрузки перейдёт на вторичные, которые вследствие этого могут быть

перегружены как результат «эффект домино».

Также стоит учитывать, что даже парные мышцы человека (исследуемые мышцы) имеют незначительную асимметрию. Так, например, у правши сильнее развиты мышцы на правой руке. Симметричные мышцы также имеют различную степень активности вследствие многих факторов, как внутренних, так и внешних, которые оказывают воздействие на человека в течение жизни [18]. Исходя из этого полученные для каждой стороны результаты следует усреднять, принимая, что активность

мышц идентична, поскольку задача состоит в том, чтобы определить активность мышечной пары, а не выявлять существующую асимметрию между ними, которая является нормой (в индивидуальных случаях отклонение в 8–18%) при незначительных отклонениях в результате активности [18].

Исследование эффективности использования ПЭ было проведено в два этапа. На первом этапе моделировалась

трудовая деятельность без применения ПЭ, на втором этапе – с его использованием [1]. Каждый этап включал по 2 типа деятельности:

- перемещение груза весом 24 кг с одной поверхности на другую;
- удерживание груза весом 6 кг перед собой.

Рассмотрим схему экспериментов для моделирования трудовой деятельности (рис. 4).



Рис. 4. Схема моделирования трудовой деятельности

Fig. 4. Labor activity modeling schem

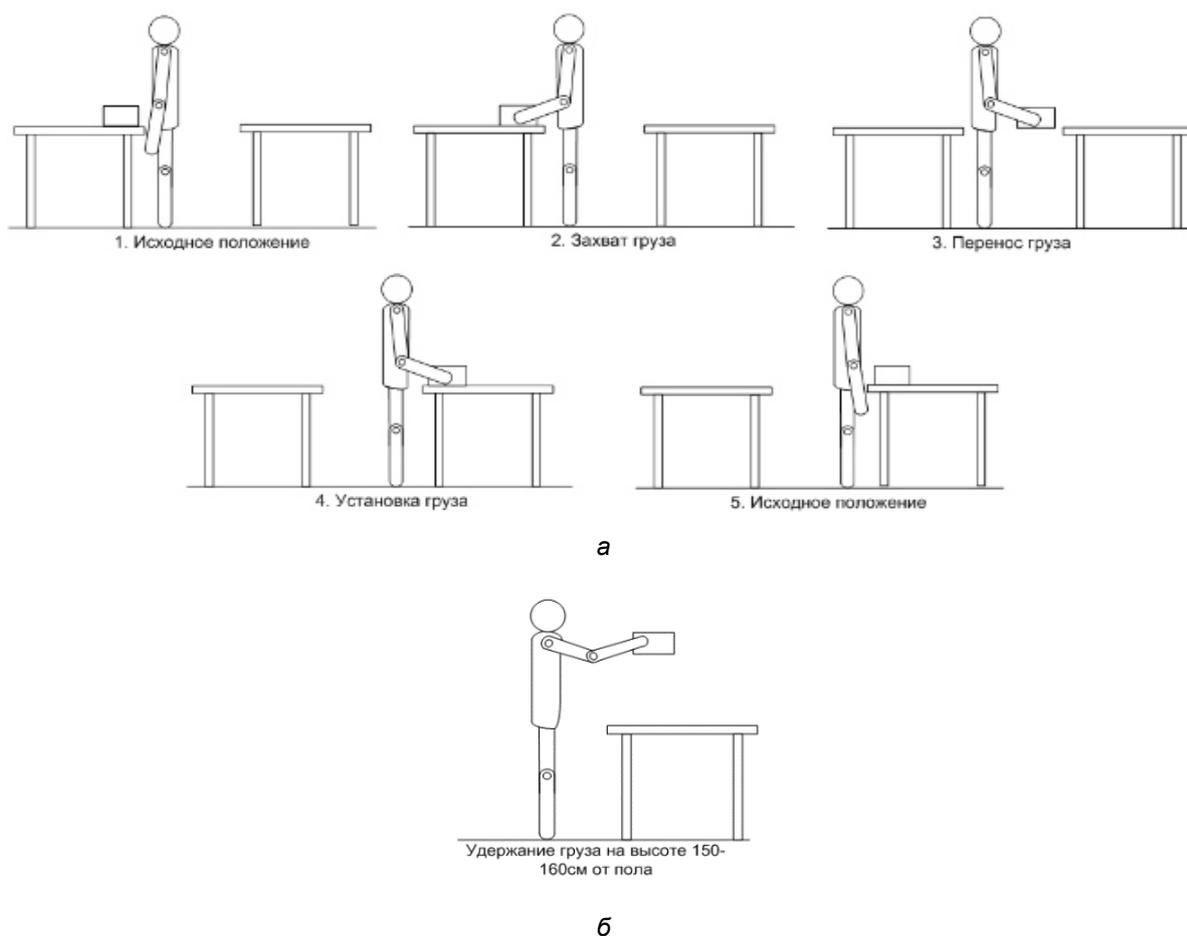
Перед началом тестирования участниками была выполнена 10-минутная разминка, состоящей из динамической растяжки как для верхней, так и для нижней части тела [19]. После установки

датчиков функциональной активности участникам было предложено выполнить два испытания для исследуемых мышц с целью последующей калибровки датчиков (Р 2.2.2006-05. Гигиена

труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда).

По разработанному плану эксперимента (ГОСТ Р. 11228-1-2009. Эргономика. Ручная обработка грузов. Поднятие и переноска. Общие требования) участникам нужно выполнить 15

подходов, включающих в себя перенос груза весом 24 кг ( $0,33 \times 0,13 \times 0,1 \text{ м}^3$ ) со стола на стол на уровне 0,78 м от пола и на расстояние 1 м, а затем удержание груза весом 6 кг ( $0,16 \times 0,06 \times 0,05 \text{ м}^3$ ) перед собой на вытянутых руках, 1,5–1,6 м над уровнем пола (рис. 5, а, б).



**Рис. 5.** Схемы выполнения работы: а – выполнение перемещения груза; б – удержание груза

**Fig. 5.** Schemes of work: а – execution of cargo movement; б – cargo retention

Каждое испытание начиналось со стандартизированной позы – вертикальная стойка, руки по швам, чтобы свести показания датчиков движения к нулю. Время переноса и соответственно 1-го подхода регулировалось следующим образом: 1 с – исходное положение; 2 с –

захват груза; начало подъёма; 3–5 с – перенос груза; 6 с – опускание груза; 7 с – исходное положение.

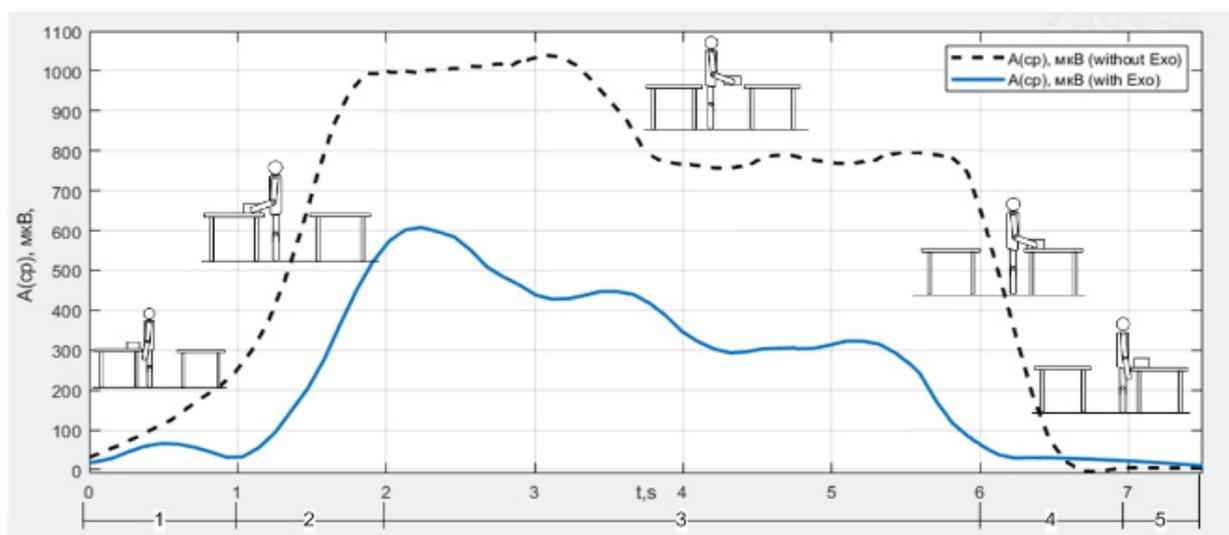
Порядка 5 с отдыха давалось между подходами переноса груза, порядка 1–1,5 ч – между типами работ, от 5 ч – между испытаниями без ПЭ и с ним.

Тип работ по удержанию груза проводился также с целью оценивающий продолжительность комфортной работы (на усталость) без применения ПЭ и с его применением. Эксперимент проводился в правильном положении поясницы, чтобы избежать неправильного распределения нагрузки. Руки при этом были выставлены перед собой на уровне плеч, в локте немного согнуты, образуя тупой угол  $160 \pm 10^\circ$  (ГОСТ Р. 11228-1-2009. Эргономика. Ручная обработка грузов. Поднятие и переноска. Общие требования). В рамках данного эксперимента участники

удерживали груз комфортную по самоощущению продолжительность времени.

### Результаты и их обсуждение

Результаты проведенного исследования с использованием упомянутых ранее методов выявили существенные различия между показателями участников, выполняющих задания без ПЭ и с его использованием. На рисунке 6 графически представлены результаты активности бицепса в моделируемой деятельности одного подхода переноса груза по амплитудным значениям сигналов мышц.

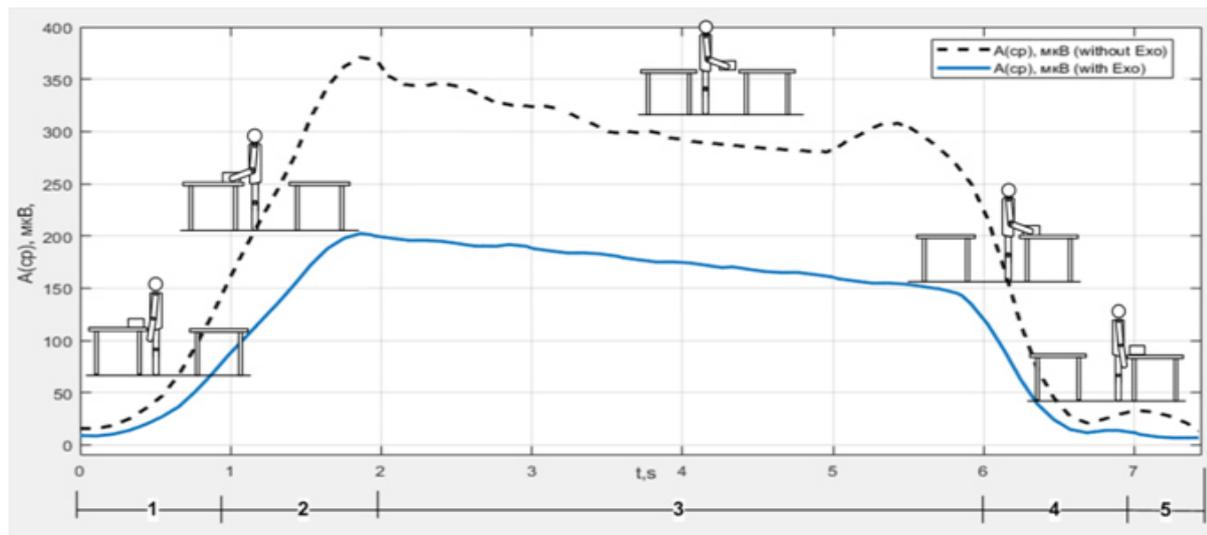


**Рис. 6.** Графики усреднённой активности бицепса во время выполнения одного подхода переноса груза для испытаний без использования ПЭ и с его использованием: 1 – исходное положение; 2 – захват груза – начало подъёма; 3 – перенос груза; 4 – установка груза; 5 – исходное положение

**Fig. 6.** Graphs of the average biceps activity during a single nose lift approach cargo for testing without the use of PE and with its use: 1 – initial position; 2 – cargo capture – the beginning of lifting; 3 – cargo transfer; 4 – cargo installation; 5 – starting position

Анализируя данные (рис. 6), можно отметить, что при выполнении первого подхода, включающего одноразовое перемещение груза, активность мышц заметно уменьшалась при использовании ПЭ, что снижает потенциальные риски, связанные с воздействием на человека нагрузок во время работы.

На рисунке 7 графически представлены результаты активности лучевого сгибателя запястья в моделируемой деятельности одного подхода переноса груза по амплитудным значениям сигналов мышц.



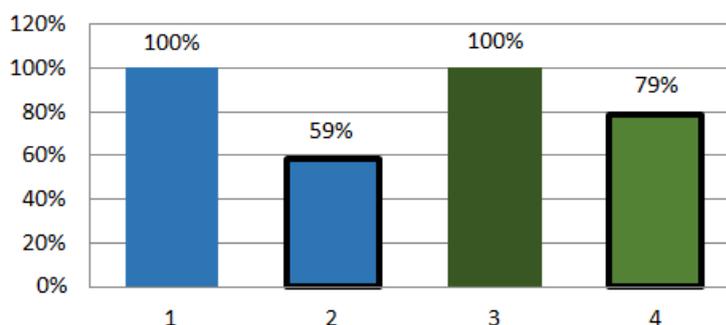
**Рис. 7.** Графики усреднённой активности лучевого сгибателя запястья во время выполнения одного подхода переноса груза для испытаний без использования ПЭ и с его использованием: 1 – исходное положение; 2 – захват груза – начало подъёма; 3 – перенос груза; 4 – установка груза; 5 – исходное положение

**Fig. 7.** Graphs of the average activity of the radial flexor of the wrist during the exercise one approach of cargo transfer for testing without the use of PE and with its use: 1 – starting position; 2 – cargo capture – the beginning of lifting; 3 – cargo transfer; 4 – load installation; 5 – starting position

На основании данных (рис. 7) видно, что при выполнении одного подхода, который включает одноразовое перемещение груза, активность исследуемых мышц существенно снижается при использовании ПЭ.

По полученным данным (рис. 6–7) очевидно, что человеку требуется

прикладывать меньше усилий для переноса груза при использовании ПЭ. Данные, представленные на рисунке 8, показывают среднее значение снижения мышечной активности локтевого сгибателя запястья при переносе и удержании груза без использования ПЭ и с его применением.

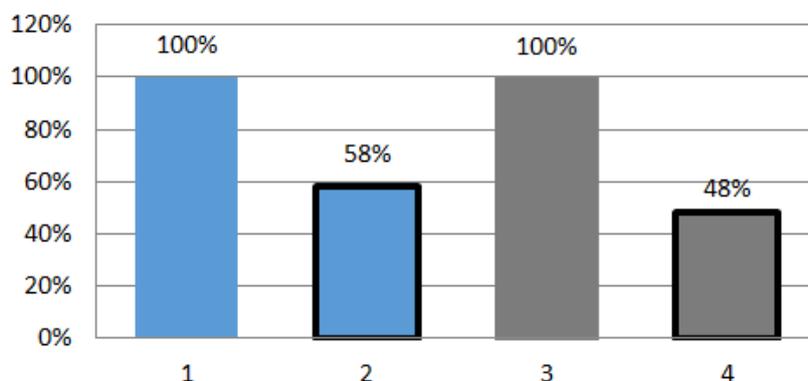


**Рис. 8.** Процентное отношение мышечной активности при переносе груза с использованием экзоскелета и без него: 1 – локтевой сгибатель запястья при переносе груза без экзоскелета; 2 – локтевой сгибатель запястья при переносе груза в экзоскелете; 3 – бицепс при переносе груза без экзоскелета; 4 – бицепс при переносе груза в экзоскелете

**Fig. 8.** Percentage of muscle activity when carrying cargo with and without an exoskeleton: 1 – is the elbow flexor of the wrist when carrying cargo without an exoskeleton; 2 – is the elbow flexor of the wrist when carrying cargo in an exoskeleton; 3 – is the biceps when carrying cargo without an exoskeleton; 4 – is the biceps when carrying cargo in an exoskeleton

Данные, представленные на рисунке 9, показывают среднее значение снижения мышечной активности

бицепса при переносе и удержании груза без использования ПЭ и с его применением.



**Рис. 9.** Процентное отношение мышечной активности при удержании груза с использованием экзоскелета и без него: 1 – локтевой сгибатель запястья при удержании груза без экзоскелета; 2 – локтевой сгибатель запястья при удержании груза в экзоскелете; 3 – бицепс при удержании груза без экзоскелета; 4 – бицепс при удержании груза в экзоскелете

**Fig. 9.** Percentage of muscle activity when holding a load with and without an exoskeleton: 1 – elbow flexor of the wrist when holding a load without an exoskeleton; 2 – elbow flexor of the wrist when holding a load in an exoskeleton; 3 – biceps when holding a load without an exoskeleton; 4 – biceps when holding a load in an exoskeleton

Анализируя полученные данные (рис. 8–9) были получены следующие результаты: во время переноса груза активность локтевого сгибателя запястья при использовании ПЭ снижалась в среднем на 41%, бицепса – на 21%; во время удержания груза активность локтевого сгибателя запястья при использовании ПЭ снижалась в среднем на 42%, бицепса – на 52%.

По результатам замеров основных физиологических показателей получились следующие усреднённые результаты, подтверждающие эффективность применения ПЭ:

- после эксперимента с использованием ПЭ насыщенность крови кислородом (сатурация) снижалась на 1,5% по сравнению с состоянием покоя, тогда как после эксперимента без ПЭ она падала на 3%;

- давление после эксперимента с применением ПЭ повышалось на 1–7 единиц относительно значений в покое, в то время как без использования ПЭ оно возрастало на 10–12 единиц по сравнению со значениями в покое;

- частота сердечных сокращений после проведения эксперимента при использовании ПЭ увеличивалась на 1–3/1–9 единиц в сравнении со значениями в состоянии покоя, в то время как без использования ПЭ увеличивалась на 6–7/4–12 в сравнении с состоянием покоя.

Не менее важны результаты эксперимента, оценивающего продолжительность комфортной работы без применения ПЭ и с его применением, поскольку зачастую во время работы с грузом человек не соблюдает установленные временные отрезки для снижения утомляемости, которые прописываются в

различных методиках и инструкциях по охране труда. Полученные результаты показали, что в экзоскелете продолжительность удержания груза в среднем составляла 4 мин 50 с. Без использования экзоскелета этот показатель составил лишь 1 мин 55 с.

Анализируя полученные результаты, имеем, что на 52–42% снижается активность мышц, что положительно влияет продолжительность комфортной работы в ПЭ (рис. 8–9). Также результаты показали, что в среднем в 2,5 раза увеличилась продолжительность комфортной работы в ПЭ. По словам участников, с ПЭ легче выполнять работу, и ощущение усталости наступает позже.

Интервьюирование участников по специальным вопросам для случаев с использованием ПЭ дало следующие результаты:

- оценка комфорта и скорости надевания / снятия ПЭ показала, что затруднения возникали в первые несколько раз надевания / снятия;

- оценка скорости привыкания к использованию ПЭ показала, что требуется порядка 3–5 ч для привыкания и комфортной работы;

- оценка удобства использования ПЭ во время отдыха или выполнения операций, отличных от рабочих, показала, что после истечения срока привыкания к использованию экзоскелет ощущался как верхняя одежда и не приносил дискомфорта, за исключением случаев, когда первоначально участникам недовольно было оценено удобство расположения на нём ПЭ, что в дальнейшем привело к дискомфорту, для устранения которого требовалась индивидуальная дополнительная регулировка, после которой жалобы исчезали.

Согласно ответам участников, все замечали небольшую разницу в пользу использования ПЭ. Особенно заметна помощь ПЭ после ряда выполненных подходов.

Также была определена рабочая зона при работе в экзоскелете (рис. 10) для оценивания комфортности работы в ПЭ.

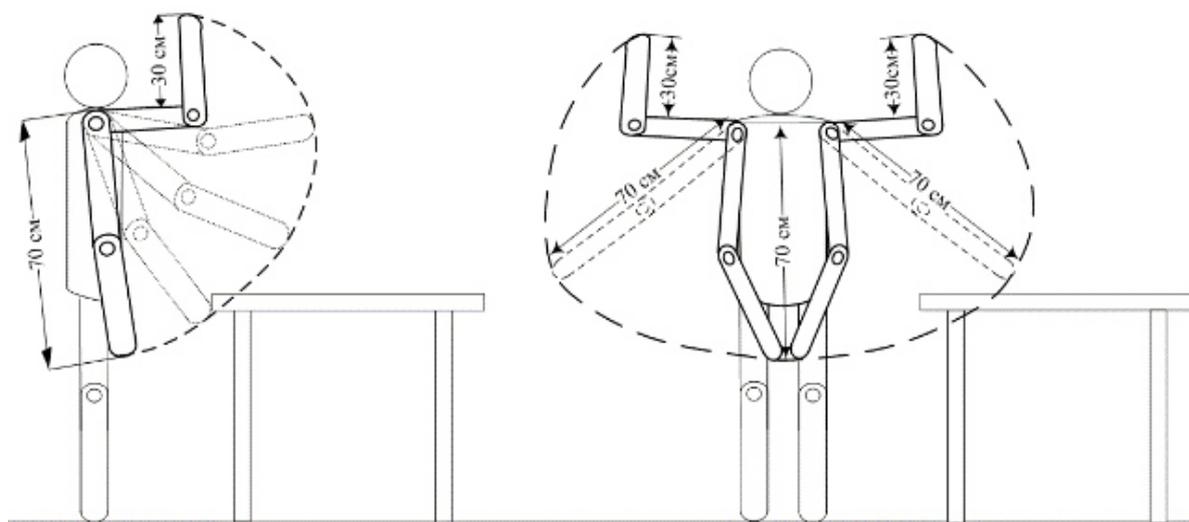


Рис. 10. Рабочая зона при работе в экзоскелете

Fig. 10. Working area when working in an exoskeleton

По полученным данным имеем, что экзоскелет незначительно сковывает движения. Так поднять руки вверх можно только в согнутых локтях. Данное ограничение в передвижении рук над головой обусловлено геометрическими особенностями тестируемого устройства.

## Выводы

Современные подходы по определению функционального состояния человека, в т. ч. и во время трудовой деятельности, сопряжённой со стереотипными движениями, включающие измерение основных биологических показателей, «захват движений» и использование электромиографии, позволяют проводить объективную физиологическую оценку эффективности и, что немаловажно, безопасности применения ПЭ в лабораторных условиях.

Результаты настоящего исследования с использованием вышеперечисленных методов, которые могут дополнить имеющиеся подходы к исследованию функционального состояния работников физического труда, подтвердили эффективность и безопасность применения тестируемого ПЭ в условиях работы с грузом, а также минимизацию рисков,

возникающих в результате стереотипных движений в поясничном отделе.

Стоит отметить, что во время работы с грузом часть стереотипных и рабочих движений, возникающих при локальной нагрузке (с участием мышц кистей и пальцев рук), не могут быть нивелированы применением тестируемого ПЭ, а при региональной нагрузке (при работе с преимущественным участием мышц рук и плечевого пояса) уже могут быть нивелированы.

По полученным результатам данного исследования можно сделать вывод, что тестируемый образец ПЭ, насколько смогли оценить, является эффективным и безопасным.

Однако выводы о безусловной безопасности и высокой эффективности применения данной модели ПЭ на рабочих местах в реальных условиях следует делать индивидуально. При этом рекомендуется учитывать результаты данной проведенной работы, особенности конкретного производства, включая наличие вредных и / или опасных факторов, точные характеристики технологических процессов, нюансы производственных операций и используемое оборудование.

## Список литературы

1. Yatsun A., Shcherbakova M., Malchikov A. Experimental studies of a soft industrial exoskeleton in work-related activity for the evaluation of its operational efficiency // E3S Web of Conferences. 2024. N 474. P. 01031.

2. The Effect of a Wearable Assistive Trunk Exoskeleton on the Motor Coordination of People with Cerebellar Ataxia / A. Tatarelli [et al.] // *Applied Sciences*. 2024. N 14(15). P. 6537.

3. Современные методы исследования безопасности и физиологической эффективности применения промышленных экзоскелетов / А. М. Герегей [и др.] // *Анализ риска здоровью*. 2020. № 3. С. 148–159.

4. Куприна Н. И., Севрюков В. В. Профессиональные полиневропатии верхних конечностей от физических перегрузок // *Известия российской военно-медицинской академии*. 2020. Т. 39, № S2. С. 142–143.

5. Актуальность использования промышленных экзоскелетов для снижения количества профессиональных заболеваний опорно-двигательного аппарата верхней части тела / И. А. Орлов [и др.] // *Медицина труда и промышленная экология*. 2019. Т. 59, № 7. С. 412–416.

6. Самонкина М. Е. Влияние здоровья населения на экономику в РФ // *Актуальные проблемы общества, экономики и права в контексте глобальных вызовов: сборник статей Международной научно-практической конференции / Международный центр научного партнерства «Новая Наука»*. Петрозаводск, 2023. С. 43–48.

7. Экзоскелеты – это новая необходимость. Почему российской промышленности придется их использовать? URL: <https://vc.ru/tech/273882-ekzoskelety-eto-novaya-neobhodimost-pochemu-rossiyskoy-promyshlennosti-pridetsya-ih-ispolzovat> (дата обращения: 26.09.2024).

8. Ванюшин Ю. С., Хайруллин Р. Р. Кардиореспираторная система как индикатор функционального состояния организма спортсменов // *Теория и практика физической культуры*. 2015. № 7. С. 11–14.

9. Objective and Subjective Effects of a Passive Exoskeleton on Overhead Work // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2020. Vol. 28(1). P. 152–164. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2019.2945368>

10. Ланская О. В., Ланская Е. В. Электромиографическое исследование активности мышц у студентов физкультурного вуза, специализирующихся в различных видах спорта // *Новые исследования*. 2017. № 1 (50). С. 50–64.

11. The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work / T. Bosch, J. Eck, K. Knitel, M. Looze // *Applied Ergonomics*. 2016. N 54. P. 212–217. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.12.003>

12. Industrial Wearable Exoskeletons and Exosuits Assessment Process / J. Masood, A. Dacal-Nieto, V. Alonso-Ramos, M. I. Fontano, A. Voilqué, J. Bou // *Wearable Robotics*:

Challenges and Trends: Conference paper. Springer, 2018. P. 234–238. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01887-0\\_45](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01887-0_45)

13. Яцун А. С., Никулин Я. С., Логунов Е. Р. Опыт внедрения промышленных экзоскелетных систем на предприятиях пищевой промышленности // Завалишинские чтения 23: сборник докладов XVIII Международной конференции по электромеханике и робототехнике / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. СПб., 2023. С. 149–154.

14. Экзоскелеты: анализ конструкций, классификации, принципы создания, основы моделирования / С. Ф. Яцун, В. Е. Павловский, Б. В. Лушников, О. В. Емельянова, А. С. Яцун, С. И. Савин, А. В. Ворочаев. Курск: Университетская книга, 2014. 148 с.

15. Экзоскелеты: анализ конструкций, классификации, принципы создания, основы моделирования / С. Ф. Яцун [и др.]. Курск: Университетская книга, 2015. 179 с.

16. Callibri Muscle Tracker. URL: <https://callibri.com/ru/callibri-muscle-tracker> (дата обращения: 05.09.2024).

17. Гайворонский И. Нормальная анатомия человека. СПб.: Спецлит, 2022. Т. 1. С. 212–286.

18. Функциональная асимметрия как биологический феномен сопутствующий спортивному результату / С. С. Худик, А. И. Чикуров, А. Л. Войнич, С. В. Радаева // Вестник Томского государственного университета. 2017. № 421. С. 193–202.

19. Технические приемы и рабочие методы подъема и перемещения тяжестей. URL: <https://labor-safety.org/blog/> (дата обращения: 25.09.2024).

## Reference

1. Yatsun A., Shcherbakova M., Malchikov A. Experimental studies of a soft industrial exoskeleton in work-related activity for the evaluation of its operational efficiency. *E3S Web of Conferences*. 2024;(474):01031.

2. Tatarelli A., et al. The Effect of a Wearable Assistive Trunk Exoskeleton on the Motor Coordination of People with Cerebellar Ataxia. *Applied Sciences*. 2024;(14):6537.

3. Geregey A.M., et al. Modern research methods for the safety and physiological effectiveness of industrial exoskeletons. *Analiz riska zdorov'yu = Health Risk Analysis*. 2020;(3):148–159. (In Russ.)

4. Kuprina N.I., Sevryukov V.V. Professional polyneuropathies of the upper extremities from physical overloads. *Izvestiya rossiiskoi voenno-meditsinskoi akademii = Proceedings of the Russian Military Medical Academy*. 2020;39(S2):142–143. (In Russ.)

5. Orlov I.A., et al. The relevance of using industrial exoskeletons to reduce the number of occupational diseases of the musculoskeletal system of the upper body. *Meditina truda i promyshlennaya ekologiya = Occupational Medicine and Industrial Ecology*. 2019;59(7):412–416. (In Russ.)

6. Samonkina M.E. The impact of public health on the economy in the Russian Federation. In: *Aktual'nye problemy obshchestva, ekonomiki i prava v kontekste global'nykh vyzovov: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Actual problems of society, economics and law in the context of global challenges: Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference*. Petrozavodsk: Mezhdunarodnyi tsentr nauchnogo partnerstva "Novaya Nauka"; 2023. P. 43–48. (In Russ.)

7. Exoskeletons are a new necessity. Why would Russian industry have to use them? Available at: <https://vc.ru/tech/273882-ekzoskelety-eto-novaya-neobhodimost-pochemu-ros-siyskoy-promyshlennosti-pridetsya-ih-ispolzovat> (accessed 26.09.2024).

8. Vanyushin Yu.S., Khairullin R. R. Cardiorespiratory system as an indicator of the functional state of the athletes' body. *Teoriya i praktika fizicheskoi kul'tury = Theory and Practice of Physical Culture*. 2015;(7):11–14. (In Russ.)

9. Objective and Subjective Effects of a Passive Exoskeleton on Overhead Work. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2020;28(1):152–164. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2019.2945368>

10. Lanskaya O.V., Lanskaya E.V. Electromyographic study of muscle activity in students of a physical education university specializing in various sports. *Novye issledovaniya = New Research*. 2017;(1):50–64. (In Russ.)

11. Bosch T., Eck J., Knitel K., Looze M. The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics*. 2016;(54):212–217. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.12.003>

12. Masood J., Dacal-Nieto A., Alonso-Ramos V., Fontano M.I., Voilqué A., Bou J. Industrial Wearable Exoskeletons and Exosuits Assessment Process. In: *Wearable Robotics: Challenges and Trends: Conference paper*. Springer; 2018. P. 234–238. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01887-0\\_45](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01887-0_45)

13. Yatsun A.S., Nikulin Ya.S., Logunov E.R. The experience of implementing industrial skeleton systems in food industry enterprises. In: *Zavalishinskie chteniya 23: sbornik dokladov XVIII Mezhdunarodnoi konferentsii po elektromekhanike i robototekhnike = Zavalishinsky readings 23: Collection of reports of the XVIII International Conference on Electromechanics*

*and Robotics*. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2023. P. 149–154. (In Russ.)

14. Yatsun S.F., Pavlovsky V.E., Lushnikov B.V., Yemelyanova O.V., Yatsun A.S., Savin S.I., Vorochaev A.V. Exoskeletons: design analysis, classifications, principles of creation, principles of modeling. Kursk: Universitetskaya kniga; 2014. 148 p. (In Russ.)

15. Yatsun S.F., et al. Exoskeletons: analysis of structures, classifications, principles of creation, principles of modeling. Kursk: Universitetskaya kniga; 2015. 179 p. (In Russ.)

16. Callibri Muscle Tracker. Available at: <https://callibri.com/ru/callibri-muscle-tracker> (accessed 05.09.2024).

17. Gaivoronsky I. Normal human anatomy. Vol. 1. Sankt-Peterburg: Speclit; 2022. P. 212–286. (In Russ.)

18. Khudik S.S., Chikurov A.I., Voynich A.L., Radaeva S.V. Functional asymmetry as a biological phenomenon accompanying athletic performance. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Tomsk State University*. 2017;(421):193–202. (In Russ.)

19. Technical techniques and working methods of lifting and moving weights. (In Russ.) Available at: <https://labor-safety.org/blog/> (accessed 25.09.2024).

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Яцун Андрей Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ayatsun@ya.ru, Researcher ID: N-6212-2016, ORCID: 0000-0002-9336-7295

**Щербакова Мария Петровна**, преподаватель кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: 5-storm-7@mail.ru, ORCID: 0009-0006-6472-5862

**Andrey S. Yatsun**, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ayatsun@ya.ru, Researcher ID: N-6212-2016, ORCID: 0000-0002-9336-7295

**Maria P. Shcherbakova**, Lecturer of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: 5-storm-7@mail.ru, ORCID: 0009-0006-6472-5862

**Мальчиков Андрей Васильевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zveroknnp@gmail.com, Researcher ID: N-8856-2016, ORCID: 0000-0003-2902-1721

**Andrei V. Malchikov**, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zveroknnp@gmail.com, Researcher ID: N-8856-2016, ORCID: 0000-0003-2902-1721