

EDN: <https://elibrary.ru/nbuhyn>DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-7-432-438>

УДК 613.65: 612.743: 612.019

© Коллектив авторов, 2023

Шупорин Е.С.¹, Новожилова А.А.¹, Герегей А.М.¹, Шитова Е.С.¹, Никифорок А.И.¹, Подопрсветов А.В.², Орлов И.А.²**Исследование влияния использования промышленного экзоскелета для поддержки верхних конечностей на состояние мышц рук и плечевого пояса**¹ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», пр-т Будённого, 31, Москва, 105275;²ФГУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», Миусская пл., 4, Москва, 125047

Введение. Уровень профессиональной заболеваемости, связанной с воздействием физических перегрузок и перенапряжением отдельных органов и систем свидетельствует о необходимости проведения своевременной и эффективной профилактики, одним из средств которой является внедрение перспективного типа средств индивидуальной защиты (СИЗ) — промышленных экзоскелетов. Ввиду того, что до сих пор не установлены чёткие требования и критерии их безопасности и эффективности, все исследования в данной области носят экспериментальный характер, что обуславливает необходимость проведения испытаний каждого конкретного вида экзоскелета применительно к выполнению определённых трудовых операций.

Цель исследования — изучение влияния использования промышленного экзоскелета для поддержки верхних конечностей на утомление мышц рук и плечевого пояса.

Материалы и методы. Для исследования был представлен промышленный экзоскелет, предназначенный для снижения нагрузки на верхние конечности при выполнении работ выше уровня головы пользователя. К участию в исследовании были привлечены 11 здоровых добровольцев. В условиях лаборатории была смоделирована трудовая деятельность, аналогичная работе на автомобильном конвейере с классом тяжести 3.2. В ходе выполнения работы, как без использования промышленного экзоскелета, так и с его использованием, с помощью поверхностной электромиографии (ЭМГ) регистрировали биоэлектрическую активность мышц верхних конечностей и плечевого пояса с обеих сторон. Кроме того, до работы и после её окончания проводили миотонометрию и динамометрию с целью регистрации биомеханических свойств исследуемых мышц, а также силы и выносливости рук.

Результаты. В результате регистрации ЭМГ-сигнала установлено, что активность передней дельтовидной мышцы справа и двуглавой мышцы плеча справа при использовании промышленного экзоскелета в работе снижается более, чем на 50%. Показатели выносливости и силы, зарегистрированные в ходе динамометрии, снижались после выполнения работы как с применением экзоскелета, так и без него, от 1% до 36%, однако их динамика не соответствовала в полной мере классическим представлениям о развитии мышечного утомления. Анализ данных миотонометрии не показал статистически значимых изменений параметров исследуемых мышц.

Ограничения исследования. Ограничениями данного исследования являются: небольшой размер выборки (11 добровольцев), отсутствие расчёта размера выборки, использование небольшого набора используемых медико-биологических методов оценки состояния человека.

Выводы. Применение исследуемого промышленного экзоскелета при выполнении моделируемых трудовых операций снижает биоэлектрическую активность основных задействованных в работе мышц, что доказывает его эффективность. Разработанная методика поверхностной ЭМГ может в дальнейшем быть использована при проведении подобных работ. Динамометрия и миотонометрия не показали достаточной чувствительности в проведённом исследовании, что обуславливает необходимость разработки специальных методик для решения аналогичных задач.

Этика. Протокол исследования был одобрен Локальным этическим комитетом при ФГБНУ «НИИ МТ» (протокол заседания № 3 от 20.04.2022 г.).

Ключевые слова: промышленный экзоскелет; мышечное утомление; электромиография; миотонометрия; динамометрия; медицина труда; профессиональная заболеваемость

Для цитирования: Шупорин Е.С., Новожилова А.А., Герегей А.М., Шитова Е.С., Никифорок А.И., Подопрсветов А.В., Орлов И.А. Исследование влияния использования промышленного экзоскелета для поддержки верхних конечностей на состояние мышц рук и плечевого пояса. *Мед. труда и пром. экол.* 2023; 63(7): 432–438. <https://elibrary.ru/nbuhyn> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-7-432-438>

Для корреспонденции: Шупорин Евгений Сергеевич, науч. сотр. ФГБНУ «НИИ МТ». E-mail: ppe-lab@irioh.ru

Участие авторов:

Шупорин Е.С. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, написание и редактирование текста;
 Новожилова А.А. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, написание и редактирование текста;
 Герегей А.М. — концепция и дизайн исследования, написание и редактирование текста;
 Шитова Е.С. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, написание и редактирование текста;
 Никифорок А.И. — сбор и обработка данных, написание и редактирование текста;
 Подопрсветов А.В. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных;
 Орлов И.А. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, написание и редактирование текста.

Финансирование. Работа выполнена за счёт гранта РНФ (проект № 18-71-10112 П).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 07.06.2023 / Дата принятия к печати: 30.06.2023 / Дата публикации: 05.08.2023

Evgeniy S. Shuporin¹, Anastasia A. Novozhilova¹, Andrei M. Geregei¹, Evgeniya S. Shitova¹, Anastasia I. Nikiforuk¹, Alexey V. Podoprosvetov², Igor A. Orlov²

Study of the impact of using the industrial exoskeleton to support the upper limbs on the condition of the arms and shoulder girdle muscles

¹Izmerov Research Institute of Occupational Health, 31, Budyonnogo Ave., Moscow, 105275;

²Keldysh Institute of Applied Mathematics, 4, Miusskaya sq., Moscow, 125047

Introduction. The level of occupational morbidity associated with the effects of physical overload and overstrain of individual organs and systems indicates the need for timely and effective prevention, one of the means of which is the introduction of a promising type of PPE — industrial exoskeletons. Since there are no clear requirements and criteria of their safety and efficiency, all the researches in this field are of experimental character, which dictates the necessity of testing each particular type of exoskeleton in relation to the performance of certain labor operations.

The study aims assess the influence of using industrial exoskeleton for support of upper limbs on the arm and shoulder girdle muscles fatigue.

Materials and methods. The researchers used the presented industrial exoskeleton designed to reduce the load on the upper limbs when performing work above the level of the user's head. Eleven healthy volunteers participated in the study. In laboratory conditions, the authors simulated labor activity similar to work on an automobile conveyor with a gravity class 3.2. During the work, both without the use of an industrial exoskeleton and with its use, scientists measured the bioelectric activity of the muscles of the upper extremities and shoulder girdle on both sides using surface EMG. In addition, before and after the work, the authors performed myotonometry and dynamometry in order to register the biomechanical properties of the studied muscles, as well as strength and endurance of the hands.

Results. As a result of recording the EMG-signal, scientists found that the activity of the anterior deltoid muscle on the right and the biceps muscle of the shoulder on the right when using an industrial exoskeleton in work is reduced by more than 50%. The indicators of endurance and strength recorded during dynamometry decreased after performing work both with and without an exoskeleton, from 1% to 36%, but their dynamics did not fully correspond to classical ideas about the development of muscle fatigue. The analysis of myotonometry data did not show statistically significant changes in the parameters of the studied muscles.

Limitations. The limitations of this study are: a small sample size (eleven volunteers), the lack of calculation of the sample size, the use of a small set of used biomedical methods for assessing the human condition.

Conclusion. *The use of the studied industrial exoskeleton when performing simulated labor operations reduces the bioelectric activity of the main muscles involved in the work, which proves its effectiveness. The developed technique of surface EMG can be used in the future when carrying out such work. Dynamometry and myotonometry did not show sufficient sensitivity in the study, which necessitates the development of special techniques for solving similar problems.*

Ethics. The Local Ethics Committee of Izmerov Research Institute of Occupational Health have approved the Protocol of the study (the protocol No.3 dated 04/20/2022).

Keywords: *industrial exoskeleton; muscle fatigue; electromyography; myotometry; dynamometry; occupational health; occupational morbidity*

For citation: Shuporin E.S., Novozhilova A.A., Geregey A.M., Shitova E.S., Nikiforuk A.I., Podoprosvetov A.V., Orlov I.A. Study of the impact of using the industrial exoskeleton to support the upper limbs on the condition of the arms and shoulder girdle muscles. *Med. truda i prom. ekol.* 2023; 63(7): 432–438. <https://elibrary.ru/nbuhyn> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-7-432-438> (in Russian)

For correspondence: *Evgeny S. Shuporin*, research associate of Izmerov Research Institute of Occupational Health. E-mail: ppe-lab@irioh.ru

Information about authors: Shuporin E.S. <https://orcid.org/0000-0001-7590-431X>
 Novozhilova A.A. <https://orcid.org/0000-0002-2493-1155>
 Geregey A.M. <https://orcid.org/0000-0002-7927-2505>
 Shitova E.S. <https://orcid.org/0000-0002-4379-5187>
 Nikiforuk A.I. <https://orcid.org/0009-0000-2161-6232>
 Podoprosvetov A.V. <https://orcid.org/0000-0002-3608-7895>
 Orlov I. A. <https://orcid.org/0000-0002-5634-9426>

Contribution:

Shuporin E.S. — the concept and design of the study, data collection and processing, writing and editing of text;
Novozhilova A.A. — the concept and design of the study, data collection and processing, writing and editing of text;
Geregey A.M. — the concept and design of the study, writing and editing of text;
Shitova E.S. — the concept and design of the study, data collection and processing, writing and editing of text;
Nikiforuk A.I. — data collection and processing, writing and editing of text;
Podoprosvetov A.V. — the concept and design of the study, data collection and processing;
Orlov I.A. — the concept and design of the study, data collection and processing, writing and editing of text.

Funding. This work was funded by a grant from the Russian Science Foundation (Project No. 18-71-10112 P).

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Received: 07.06.2023 / Accepted: 30.06.2023 / Published: 05.08.2023

Введение. На настоящий момент большая часть производств по всему миру развивается в сторону автоматизации процессов и постепенного отказа от участия человека в выполнении тяжёлой физической работы. Однако значительная часть трудовых операций все ещё подразумевает использование ручного труда [1]. При этом физические нагрузки на рабочем месте оказывают существенное влияние

на опорно-двигательный аппарат работников, в том числе на верхние конечности, о чем свидетельствует статистика заболеваний, связанных с работой [2–4]. Помимо трудностей в выполнении рабочих операций, непосредственно связанных с таким заболеванием, подобная патология характеризуется невозможностью полного выключения работы руками из повседневной жизни человека,

что приводит к крайне длительным периодам восстановления работоспособности. Исходя из этого, очевидным становится факт необходимости ранней профилактики профессиональной патологии верхних конечностей, и одним из средств, позволяющих осуществлять эту профилактику, является использование промышленного экзоскелета (ПЭ).

Промышленный экзоскелет представляет собой носимое на человеке средство индивидуальной защиты опорно-двигательного аппарата, компенсирующее и(или) перераспределяющее нагрузку на опорно-двигательный аппарат¹. Чаще всего они находят применение при выполнении статических нагрузок с работой руками на уровне головы или чуть выше, а также при осуществлении операций по переносу или удержанию тяжёлых грузов [5, 6]. Стоит отметить, что использование данных устройств оправдано лишь в тех случаях, когда отсутствует возможность изменения производственного процесса или выключения из него ручного труда. В этом случае можно утверждать, что в условиях производства ПЭ является средством индивидуальной защиты (СИЗ) работника. Как любое СИЗ, ПЭ должен отвечать правилам безопасности и эффективности, а также иметь определённые стандарты качества, однако на данный момент единой нормативной базы, содержащей стандартные требования к ПЭ, не создано, и все работы, направленные на изучение этих устройств, носят экспериментальный характер.

За последние годы проведено значительное число работ, где в качестве объекта исследования выступал человек, использующий ПЭ [7–10]. Однако, нет единого стандарта оценки влияния ПЭ на состояние пользователя при выполнении конкретных рабочих задач и для каждого отдельного ПЭ. Ввиду этого, исследования, направленные на изучение состояния человека, применяющего в работе ПЭ, не теряют своей актуальности.

Основными методами, применяемыми при исследованиях ПЭ, являются субъективные и объективные способы оценки общего состояния человека, дискомфорта и боли, усталости, биомеханики движений, производительности труда и качества выполнения работы, энерготрат, постральной устойчивости, а также мышечной активности при ношении ПЭ [3, 11, 12]. Определение влияния использования ПЭ, предназначенных для поддержки верхних конечностей, на мышцы в большинстве работ проводится путём поверхностной электромиографии (ЭМГ) и с помощью субъективных методов оценки, например с использованием шкалы Борга [2–4, 10–16]. В подавляющем большинстве данных исследований выполнение физических нагрузок не связано с реальными трудовыми операциями и зачастую не учитывает длительность работ [2, 3, 12, 14]. При этом регистрация ЭМГ осуществляется при выполнении кратковременных упражнений, что исключает развитие мышечного утомления [4, 2, 15], неизбежно развивающегося в ходе полноценного рабочего дня и являющегося основной причиной возникновения заболеваний опорно-двигательного аппарата. Помимо этого, особенности каждого конкретного ПЭ, предназначенного для снижения нагрузки при выполнении конкретной трудовой деятельности, обуславливают необходимость от-

дельного изучения состояния наиболее задействованных скелетных мышц.

Цель исследования — изучение влияния использования промышленного экзоскелета для поддержки верхних конечностей на утомление мышц рук и плечевого пояса.

Материалы и методы. Для участия в исследовании было привлечено 11 здоровых добровольцев мужского пола в возрасте $28,2 \pm 5,1$ года, ростом $179,0 \pm 7,6$ см, массой тела $72,3 \pm 10,2$ кг, не имеющих в анамнезе патологии опорно-двигательного аппарата и острых состояний на момент проведения эксперимента, а также не выполняющих ежедневные физические нагрузки в ходе своей профессиональной деятельности. Предварительно со всех участников было получено добровольное информированное согласие на участие в исследовании. Протокол исследования был одобрен Локальным этическим комитетом при ФГБНУ «НИИ МТ» (протокол заседания № 3 от 20.04.2022 г.).

Для исследования был представлен образец промышленного экзоскелета производства ООО «Экзаурус» (г. Москва), предназначенный для поддержки верхних конечностей при выполнении трудовых операций на уровне выше головы работника. В условиях лаборатории была смоделирована работа на автомобильном конвейере таким образом, что итоговый класс тяжести трудового процесса по показателям суммарной массы грузов, перемещаемых в течение каждого часа рабочего дня с рабочей поверхности, величине статической нагрузки и длительности нахождения в неудобной рабочей позе составил 3.2 [17]. Модель трудовой деятельности (МТД) заключалась в необходимости вкручивания саморезов с помощью шуруповёрта, массой 1,5 кг, из деревянного полотна, закреплённого горизонтально на уровне выше головы добровольца. Высота крепления полотна подбиралась таким образом, чтобы плечевой и локтевой суставы рабочей руки при выполнении вкручивания были согнуты под прямым углом.

Работа выполнялась всегда ведущей (правой) рукой в следующем режиме: 1 минута вкручивания и выкручивания саморезов, в течение которых правая рука всегда согнута в суставах, а левая выполняла вспомогательную роль, затем — перерыв 30 секунд, в течение которого можно было отдохнуть с опущенными руками. Циклы повторялись в течение 2 часов.

Тестирования включали в себя проведение ЭМГ, мионометрии и динамометрии.

Поверхностную ЭМГ осуществляли с использованием системы для комплексной объективной оценки двигательных функций, регистрации биомеханики движений «Биомеханика Биокиннект» (ООО «Неврокор», г. Москва). Беспроводные датчики с биполярными электродами крепились к телу добровольца в соответствии с выбранными для исследования мышцами. Поверхностные электроды располагали на расстоянии 2 см друг от друга в области проекций мышц (трапецевидной, передней части дельтовидной, двуглавой и трехглавой мышц плеча) на предварительно подготовленной коже в соответствии с рекомендациями SENIAM [18].

ЭМГ-сигнал регистрировали в течение последней минуты выполнения работы в ходе МТД, в анализ включали участки записи, не содержащие артефактов и выбросов. Для нормализации сигнала до начала проведения исследования вне МТД для каждой исследуемой мышцы была записана ЭМГ-кривая при максимальном произвольном

¹ Проект ГОСТ Р Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты опорно-двигательного аппарата. Экзоскелеты промышленные. Классификация. Термины и определения (URL: <https://docs.cntd.ru/document/S66393948>, дата обращения 17.05.2023 г.)

усилии (МПУ). МПУ достигалось путём выполнения добровольцем серии простых движений с максимальным утяжелением гантелями (вес гантелей подбирался предварительно, индивидуально для каждого добровольца таким образом, чтобы последующее повышение веса гантели вызывало тремор исследуемых мышц и невозможность выполнения движения). Для каждой исследуемой мышцы были выбраны следующие упражнения:

- для передней части дельтовидной мышцы — удержание гантелей прямыми руками с согнутыми в сагиттальной плоскости на 90 градусов плечевыми суставами;
- для двуглавых мышц — удержание одной гантели большого веса двумя руками, с согнутыми в локтевых суставах под прямым углом;
- для трапециевидных мышц — удержание одной гантели большого веса двумя выпрямленными руками с максимальным прижатием плечевых суставов к шее и под наклоном корпуса;
- для трёхглавых мышц плеча — удержание гантелей за головой с согнутыми локтевыми суставами.

Ввиду того, что удержание одной гантели могло осуществляться как одной, так и двумя руками, вес одной гантели составлял от 6 до 30 кг. Длительность выполнения каждого упражнения составляла 5 секунда, после которых следовал отдых, необходимый для восстановления.

Таким образом, были получены записи биоэлектрической активности задействованных в работе мышц во время выполнения моделируемой работы, которые потом пересчитывались относительно их максимальной активности (%МПУ). Сравнивались %МПУ, полученные при выполнении работы без использования ПЭ и с его использованием. В качестве показателя активности мышцы была взята средняя амплитуда кривой.

Методика регистрации ЭМГ, включающая запись биоэлектрической активности при выполнении МПУ, ранее использовалась зарубежными авторами при проведении подобных исследований, однако некоторые подходы к её осуществлению строго не регламентированы, ввиду чего в настоящей работе авторами, в том числе, определялась чувствительность разработанного подхода.

К «сырым» сигналам ЭМГ были применены фильтры от 10 Гц до 1000 Гц. Для устранения помех от линии электропередач использовался режекторный фильтр частотой 50 Гц, после чего отфильтрованный сигнал ЭМГ подвергался полноволновому выпрямлению и сглаживался с использованием движущегося окна продолжительностью 200 мс.

Миотонометрию осуществляли с помощью прибора «MyotonPRO» в соответствии с принятой методикой измерений [19] в положении добровольца сидя с расслабленными верхними конечностями до начала МТД и сразу после окончания МТД. Измерялись тонус, жёсткость, время релаксации, упругость и ползучесть трапециевидных, передних частей дельтовидных, двуглавых и трёхглавых мышц плеча с обеих сторон.

Динамометрию проводили аналогично миотонометрии — перед работой и сразу после неё. С помощью комплекса для психофизиологического тестирования «НС-Психотест» («Нейрософт», г. Иваново) регистрировали максимальную произвольную силу (МПС) правой и левой кисти, а также выносливость — время удержания нагрузки, составляющей 70% от МПС.

Полученные экспериментальные данные подвергали статистическому анализу. Нормальность распределения данных оценивали с помощью критерия Шапиро–Уилка. Часть данных имела распределение, отличающееся от нормального, ввиду чего были использованы методы непараметрического анализа. Данные, полученные в различных миотонометрических и динамометрических тестированиях до начала и после МТД с использованием ПЭ и без его использования, подвергались анализу с использованием критерия Вилкоксона. С помощью данного критерия оценивались и результаты ЭМГ, представляющие собой %МПУ, полученные при регистрации сигнала в работе без использования ПЭ и с ним. Во всех случаях нулевая гипотеза отклонялась при уровне значимости более или равно 0,05. Числовое описание результатов миотонометрии и динамометрии осуществляли с помощью медианы и интерквартильного размаха, а результаты ЭМГ — с помощью средних и стандартного отклонения.

Результаты и обсуждение. В ходе проведения поверхностной ЭМГ было установлено, что при выполнении рабочих операций активность некоторых мышц была настолько мала, что их амплитуда не достигала пороговых значений, установленных производителями используемого оборудования. Поэтому при статистической обработке данных учитывались показатели не всех добровольцев, а только тех, у которых активность мышц была достаточной для её регистрации. При этом, в зависимости от исследуемой мышцы, количество полученных результатов варьировалось от 2 до 11. Результаты ЭМГ представлены в *таблице 1*.

Сравнительный анализ полученных данных показал, что активность двуглавой и передней дельтовидной мышц справа во время выполнения работы с использованием ПЭ была статистически значимо ниже аналогичной при выполнении работы без него на 52,6% ($p=0,03$) и на 50,1% соответственно ($p=0,003$). При этом число добровольцев, у которых средняя амплитуда ЭМГ-сигнала двуглавой мышцы справа была выше пороговых значений — 7 человек, а для передней дельтовидной мышцы это число составило 11. Помимо передней части дельтовидной мышцы, наиболее задействованными в выполнении работы мышцами оказались трапециевидные мышцы справа (11 добровольцев) и слева (9 добровольцев), а наименее — трёхглавая мышца плеча слева (2 добровольца) и передняя дельтовидная слева (5 добровольцев). Данный факт, в совокупности с отсутствием статистически значимых различий между значениями показателей, полученными для остальных исследуемых мышц, свидетельствует в пользу того, что самой активно задействованной мышцей при выполнении моделируемой в ходе исследования работы являлась передняя часть дельтовидной мышцы. Следовательно, по динамике её состояния можно судить об эффективности использования экзоскелета в целом. В данном случае снижение активности этой мышцы при МТД с применением ПЭ, выявленное у всех добровольцев, указывает на снижение нагрузки на данную область, что является основной целью представленного ПЭ. Помимо этого, отсутствие статистически значимой динамики активности мышц левой руки, незадействованной в выполнении работы, а также малое число добровольцев, у которых эта активность была достаточной для её регистрации используемым оборудованием, указывают на чувствительность разработанной методики, что позволяет использовать её при проведении последующих аналогичных работ.

Результаты поверхностной ЭМГ добровольцев, $M \pm SD$
Results of superficial electromyography, $M \pm SD$

Исследуемая мышца	%МПУ при выполнении работы		n
	без использования ПЭ	с использованием ПЭ	
Двуглавая мышца плеча справа	25,0±8,9	11,9±12,7 #	7
Двуглавая мышца плеча слева	15,2±7,1	11,0±6,6	7
Трёхглавая мышца плеча справа	20,9±7,9	20,8±15,0	7
Трёхглавая мышца плеча слева	24,3±0,7	9,9±10,6	2
Передняя часть дельтовидной мышцы справа	45,41±15,5	22,68±8,5*	11
Передняя часть дельтовидной мышцы слева	30,7±10,5	24,4±6,1	5
Трапецевидная мышца справа	49,3±23,4	31,3±25,4	11
Трапецевидная мышца слева	36,1±22,1	26,1±12,3	9

Примечания: M — средние значения показателя, SD — стандартное отклонение, МПУ — максимальное произвольное усилие, ПЭ — промышленный экзоскелет, n — число добровольцев, данные которых были использованы в статистическом анализе, * — статистически значимые различия по сравнению с показателями, полученными при выполнении работы без ПЭ.

Note: M is the average values of the indicator; SD is the standard deviation; МПУ is the maximum arbitrary effort; ПЭ is an industrial exoskeleton; n is the number of volunteers whose data were used in statistical analysis; # are statistically significant differences compared to the indicators obtained when performing work without industrial exoskeleton.

Статистический анализ данных, полученных при мионометрии, показал отсутствие статистически значимых различий между исследуемыми характеристиками мышц добровольцев до и после выполнения работы с использованием ПЭ и без него. Отсутствие статистически значимых изменений мионометрических параметров исследуемых мышц может быть связано с низкой чувствительностью используемой методики в данном исследовании. Это, в свою очередь, может быть вызвано недостаточной для выявления с помощью используемого оборудования степенью мышечного утомления, развивающегося в результате выполнения моделируемой работы, а также быстрым восстановлением состояния мышц до исходного, ввиду временных задержек в проведении мионометрических измерений после работы.

Результаты динамометрии представлены в **таблице 2**.

Сравнительный анализ данных показал статистически значимые снижение выносливости правой руки после работы без использования ПЭ по сравнению с исходными значениями показателя ($p=0,004$) на 35,9% по медиане, уменьшение максимальной силы левой руки после выполнения работы без применения ПЭ на 5,8% по медиане ($p=0,008$) и с применением ПЭ на 1,2% по медиане ($p=0,012$) по сравнению с исходными значениями. Это

указывает на развитие локального мышечного утомления правой и левой рук, развившееся в результате выполнения работы как без применения ПЭ, так и с ним. Однако, вместе с тем, отсутствие статистически значимых изменений максимальной силы правой руки и выносливости левой, которые ожидалось обнаружить в ходе исследования, могут быть вызваны преобладанием волевых усилий добровольцев при выполнении тестирований после работы над степенью локального мышечного утомления, а также очередностью проведения тестирований: сначала проводилась регистрация максимальной силы левой руки, затем её выносливости, затем максимальной силы и выносливости правой руки. Таким образом, можно предположить, что при выполнении тестирования одной рукой происходило восстановление мышечной силы и резервных возможностей другой руки, которые впоследствии отражались на результатах динамометрии. Следовательно, результаты, полученные при использовании данной методики, не могут в полной мере отражать состояние мышц верхних конечностей в ходе данного исследования.

Ограничения исследования. Настоящее исследование содержит некоторые ограничения. Прежде всего, к ним относится небольшой размер выборки добровольцев (11 человек) и отсутствие её расчёта в соответствии

Таблица 2 / Table 2

Динамика максимальной силы и выносливости добровольцев в ходе динамометрии, Me (IQR 25%; 75%), $n=11$
Dynamics of maximum strength and endurance of volunteers, Me (IQR 25%; 75%), $n=11$

Показатель, ед. изм.	Тестирование			
	Без использования ПЭ		С использованием ПЭ	
	До работы	После работы	До работы	После работы
Максимальная сила правой кисти, даН	45 (41,5; 49,3)	46 (42,5; 46,5)	45,5 (43,3; 50,3)	44,5 (42,0; 46,3)
Выносливость правой кисти, сек	8,9 (7,6; 13,1)	5,7* (2,8; 9,8)	5,8 (4,5; 11,7)	5,5 (4,6; 9,7)
Максимальная сила левой кисти, даН	43 (40,0; 43,8)	40,5* (36,3; 42,5)	41,5 (39,5; 45,3)	41,0* (37,8; 42,8)
Выносливость левой кисти, сек	6,2 (3,2; 11,3)	5,5 (3,5; 8,0)	6,0 (4,7; 8,8)	7,02 (5,0; 9,9)

Примечания: Me — медиана значений показателя, IQR — интерквартильный размах, n — число добровольцев, ПЭ — промышленный экзоскелет; * — статистически значимые изменения показателя по сравнению с тестированиями до выполнения работы.
 Note: Me is the median of the indicator values; IQR is the interquartile range; n is the number of volunteers; ПЭ is an industrial exoskeleton; * — statistically significant changes in the indicator compared to the tests before the work was completed.

с принципами статистического анализа данных. Это связано с тем, что данное исследование являлось пилотным. Также в настоящей работе был использован ограниченный набор методик оценки состояния человека, ввиду того что её целью являлась исключительно объективная оценка скелетно-мышечной системы. В последующих работах вышеуказанные недостатки и ограничения будут скорректированы с целью получения большего объёма информации о влиянии использования промышленных экзоскелетов на состояние организма человека.

Выводы:

1. Активность передней части дельтовидной мышцы и двуглавой мышцы плеча справа при выполнении моделируемой физической работы класса тяжести 3.2 правой рукой с применением промышленного экзоскелета, предназначенного для снижения нагрузки на верхние конечности и плечевой пояс, была ниже таковой при выполнении той же работы, но без его применения. Таким образом, определено, что использование промышленного экзоскелета позволяет снизить нагрузку на данные мышцы более, чем на 50%, что свидетельствует о его эффективности.

2. Методика поверхностной ЭМГ, основанная на анализе соотношения активности мышц при выполнении работы и их максимальной активности, позволила определить наиболее и наименее задействованные в выполнении работы

мышцы, а также оценить их активность при использовании добровольцами ПЭ. Кроме того, данная методика продемонстрировала высокую чувствительность, что позволяет использовать её при проведении последующих исследований, касающихся вопросов оценки эффективности применения ПЭ.

3. С помощью динамометрического тестирования путём регистрации выносливости удалось выявить развитие локального мышечного утомления правой кисти, развившееся в результате выполнения работы без применения ПЭ. Однако отсутствие статистически значимых изменений показателя максимальной силы правой руки, которое может быть связано с преобладанием волевых усилий добровольцев при выполнении тестирований после работы над степенью локального мышечного утомления, указывает на невысокую чувствительность разработанной методики, что необходимо учитывать при планировании и проведении последующих исследований.

4. Применение метода миотонометрии в данных исследованиях не продемонстрировало достаточной чувствительности, что указывает на необходимость разработки методики под конкретные исследования по особому протоколу, подразумевающему регистрацию показателей сразу после развития в мышечной ткани утомления и минимизацию задержек в проведении измерений после воздействия физической нагрузки.

Список литературы (пп. 1–16, 18 см. References)

17. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. Р 2.2.2006-05. Ивановский НИИ охраны труда; Российский государственный медицинский университет; НИИ проблем охраны труда;

ГУ НИИ медицины труда РАМН; НИИ охраны труда; Всероссийский НИИ железнодорожной гигиены; ФГУП ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова Санкт-Петербург; Тверской государственный университет. М.: Деан, 2006 г.

References

- Hazreen H. Harith, Muhammad Fuad Mohd, Sharence Nai Sowat. A preliminary investigation on upper limb exoskeleton assistance for simulated agricultural tasks. *Applied Ergonomics*. 2021; 95. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103455>
- Kirsten Huysamen, Tim Bosch, Michielde Looze, Konrad S. Stadler, Eveline Graf, Leonard W. O'Sullivan. Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities. *Applied ergonomics*. 2018; 70: 148–155. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.02.009>
- Jean Theurel, Kevin Desbrosses, Terence Roux, Adriana Savescu. Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Applied Ergonomics*. 2018; 67: 211–217. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.10.008>
- Peng Yin, Liang Yang, Shengguan Qu, Chao Wang. Effects of a passive upper extremity exoskeleton for overhead tasks. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2020; 55. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2020.102478>
- Voilqué A., Masood J., Fauroux J., Sabourin L. and Guezet O. Industrial Exoskeleton Technology: Classification, Structural Analysis, and Structural Complexity Indicator. In: *2019 Wearable Robotics Association Conference (WearRAcon)*, 25–27 March 2019, Scottsdale, AZ, USA, pp. 13–20. <https://doi.org/10.1109/WEARRACON.2019.8719395>
- Bogue R. Exoskeletons — a review of industrial applications. *Industrial Robot*. 2019; 45(5): 585–590. <https://doi.org/10.1108/IR-05-2018-0109>
- Michiel P. de Looze, Tim Bosch, Frank Krause, Konrad S. Stadler & Leonard W. O'Sullivan. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*. 2016; 59(5): 671–681. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988>
- Tasha McFarland, Steven Fischer. Considerations for Industrial Use: A Systematic Review of the Impact of Active and Passive Upper Limb Exoskeletons on Physical Exposures. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*. 2019; 7(3–4): 322–347. <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1684399>
- Mona Bär, Benjamin Steinhilber, Monika A. Rieger, Tessa Luger. The influence of using exoskeletons during occupational tasks on acute physical stress and strain compared to no exoskeleton — A systematic review and meta-analysis. *Applied Ergonomics*. 2021; 94. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103385>
- Pacifico I., Parri A., Taglione S., Sabatini A.M., Violante F.S., Molteni F. et al. Exoskeletons for workers: A case series study in an enclosures production line. *Applied Ergonomics*. 2022; 101: 103679. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103679>
- Sander De Bock, Jo Ghillebert, Renée Govaerts, Bruno Tassignon, Carlos Rodriguez-Guerrero, Simona Crea et al. Benchmarking occupational exoskeletons: An evidence mapping systematic review. *Applied Ergonomics*. 2022; 98. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103582>
- Ehsan Rashedi, Sunwook Kim, Maury A. Nussbaum & Michael J. Agnew. Ergonomic evaluation of a wearable assistive device for overhead work. *Ergonomics*. 2014; 57(12): 1864–1874. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.952682>
- Aijse de Vries, Michiel de Looze. The Effect of Arm Support Exoskeletons in Realistic Work Activities: A Review Study. *Journal of ergonomics*. 2019; 9(4): 1–9. <https://doi.org/10.35248/2165-7556.19.9.255>
- Aijse de Vries, Molly Murphy, Reinier Könemann, Idsart Kingma, Michiel de Looze. The Amount of Support Provided by a Passive Arm Support Exoskeleton in a Range of Elevated Arm Postures. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*. 2019; 7(3–4): 311–321. <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1669736>

15. Dong Jin Hyun, Kihyeon Bae, KyuJung Kim, Seungkyu Nam. A light-weight passive upper arm assistive exoskeleton based on multi-linkage spring-energy dissipation mechanism for overhead tasks. *Robotics and Autonomous Systems*. 2019; 122. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103309>
 16. Kim S., Nussbaum M.A., Mokhlespour Esfahani M.I., Alemi M.M., Alabdulkarim S., Rashedi E. Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part I — "Expected" effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance. *Applied Ergonomics*. 2018; 70: 315–322. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.02.025>
 17. Guidelines for the hygienic assessment of the factors of the working environment and the labor process. Criteria and classification of working conditions. R 2.2.2006-05. Ivanovo research institute of labor protection; Russian State Medical University; Research Institute of Labor Protection Problems; State Research Institute of Occupational Medicine of the Russian Academy of Medical Sciences; research institute of labor protection; All-Russian Research Institute of Railway Hygiene; Federal State Unitary Enterprise Central Research Institute im. acad. A.N. Krylov St. Petersburg; Tver State University. M.: Dean; 2006 Hermens H.J., Freriks B., Disselhorst-Klug C., Rau G. Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. *Journal Electromyography and Kinesiology*. 2000; 10(5): 361–74. [https://doi.org/10.1016/S1050-6411\(00\)00027-4](https://doi.org/10.1016/S1050-6411(00)00027-4) (in Russian).
 18. Muckelt P.E., Warner M.B., Cheliotis-James T. et al. Protocol and reference values for minimal detectable change of MyotonPRO and ultrasound imaging measurements of muscle and subcutaneous tissue. *Scientific Reports*. 2022; 12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17507-2>
-