

Читайте
онлайн
Read
online

Шупорин Е.С., Чудова Е.С., Ильенко О.В., Вага И.Н., Моткова Т.Ю.

Оценка эффективности применения промышленного экзоскелета по степени утомления работника

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», 105275, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Объектом исследования являлась динамика функционального состояния организма человека при выполнении физической работы с применением промышленного экзоскелета, предназначенного для разгрузки мышц спины и рук при подъёме, опускании, переносе и удерживании грузов массой до 50 кг. Исследование проведено с целью оценки эффективности применения промышленного экзоскелета для снижения утомления в условиях моделирования трудовой деятельности.

Материалы и методы. Модель трудовой деятельности работника, связанная с подъёмом, перемещением и удержанием груза, была разработана в условиях лаборатории. Для оценки эффективности применения промышленного экзоскелета проводилось сравнение степеней утомления по показателям функционального состояния скелетной мускулатуры при выполнении трудовой деятельности в лабораторных условиях с применением промышленного экзоскелета и без него. Использованы следующие медико-биологические методы: электромиография, миотонометрия и анкетирование. Полученные данные подвергали статистическому анализу.

Результаты. При выполнении работы с применением экзоскелета некоторые мышцы были в состоянии меньшего напряжения, чем при работе без него. Анализ субъективной оценки локального напряжения показывал, что физическое напряжение добровольцев было ниже при работе в экзоскелете по сравнению с работой без него.

Ограничения исследования. Небольшой объём выборки, моделирование трудовой деятельности в лаборатории не позволяют учесть всех факторов, которые воздействуют на работника, использующего экзоскелет, на производстве. Для более полной оценки эффективности промышленного экзоскелета необходим учёт динамики показателей сердечно-сосудистой, дыхательной и других систем организма.

Заключение. С точки зрения влияния использования промышленного экзоскелета на утомление при выполнении производственных операций, аналогичных лабораторной модели трудовой деятельности, можно сделать заключение об эффективности применения промышленного экзоскелета.

Ключевые слова: промышленный экзоскелет; функциональное состояние; эффективность труда; миотонометрия; электромиография

Соблюдение этических стандартов. Исследование проведено с соблюдением протокола «Исследование безопасности и эффективности применения промышленных экзоскелетов ProEXOLight и ProEXOSuperLight», одобренного Локальным этическим комитетом ФГБНУ «НИИ МТ» (протокол № 1 заседания Локального этического комитета от 25.01.2023 г.), соответствует общепринятым научным принципам Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации. Все участники дали информированное добровольное письменное согласие на участие в исследовании.

Для цитирования: Шупорин Е.С., Чудова Е.С., Ильенко О.В., Вага И.Н., Моткова Т.Ю. Оценка эффективности применения промышленного экзоскелета по степени утомления работника. *Гигиена и санитария*. 2025; 104(6): 728–733. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-6-728-733> <https://elibrary.ru/zqmfnnh>

Для корреспонденции: Шупорин Евгений Сергеевич, e-mail: ppe-lab@iriioh.ru

Участие авторов: Шупорин Е.С. — концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование; Чудова Е.С. — написание текста, редактирование; Ильенко О.В. — концепция и дизайн исследования, написание текста; Вага И.Н., Моткова Т.Ю. — сбор и обработка данных, статистическая обработка данных. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Поступила: 03.03.2025 / Поступила после доработки: 08.04.2025 / Принята к печати: 26.06.2025 / Опубликовано: 31.07.2025

Evgenii S. Shuporin, Elena S. Chudova, Oleg V. Ilyenko, Ivan N. Vaga, Tatyana Yu. Motkova

Evaluation of the efficiency of the application of an industrial exoskeleton according to the degree of employee fatigue

Izmerov Research Institute of Occupational Health, Moscow, 105275, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The object of the study was the trend in the functional state in the human body when performing physical work using an industrial exoskeleton designed to unload the muscles of the back and arms when lifting, lowering, carrying, and holding loads weighing up to 50 kg. The study was conducted to evaluate the efficiency of applying an industrial exoskeleton to reduce fatigue in a work simulation environment.

Materials and methods. In the laboratory, a model of an employee's work related to lifting, moving, and holding cargo was developed. To assess the efficiency of the application of an industrial exoskeleton, a comparison was made of the degrees of fatigue in terms of the functional state of skeletal muscles when performing laboratory model of labor activity with and without an industrial exoskeleton. The following biomedical methods were used: electromyography, myotonometry, and questionnaires. The data obtained was subjected to statistical analysis.

Results. When working with an exoskeleton, some muscles were in a state of less tension than when working without it. The results of the analysis of the subjective assessment of local stress showed the physical stress in the volunteers to be lower when working in an exoskeleton compared to working without it.

Limitations. A small sample size and modeling in labour activity in the laboratory does not allow taking into account all the factors that affect an employee using an exoskeleton in production. For a more complete evaluation of the efficiency of an industrial exoskeleton, it is necessary to take into account the dynamics of indicators of the cardiovascular, respiratory and other body systems.

Conclusions. From the point of view of the influence of the application of an industrial exoskeleton on the fatigue during production operations similar to the laboratory model of labor activity, it is possible to conclude about the efficiency of the application of an industrial exoskeleton.

Keywords: industrial exoskeleton; functional state; occupational efficiency; myotonometry; electromyography

Compliance with ethical standards. The study was conducted in compliance with the protocol “Research on the safety and efficiency of the application of an industrial exoskeletons «ProEXOLight» u «ProEXOSuperLight», approved by the Local Ethics Committee of the Izmerov Research Institute of Occupational Health (protocol No. 1 of the meeting of the Local Ethics Committee dated 25/01/2023) and the Helsinki Declaration of the World Medical Association (as amended 2013) was carried out. All participants gave informed voluntary written consent to participate in the study.

For citation: Shuporin E.S., Chudova E.S., Ilyenko O.V., Vaga I.N., Motkova T.Yu. Evaluation of the efficiency of the application of an industrial exoskeleton according to the degree of employee fatigue. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2025; 104(6): 728–733. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-6-728-733> <https://elibrary.ru/zqmfnh> (In Russ.)

For correspondence: Evgenii S. Shuporin, e-mail: ppe-lab@irioh.ru

Contribution: Shuporin E.S. – concept and design of the study, writing text, editing; Chudova E.S. – writing text, editing; Ilyenko O.V. – concept and design of research, writing text; Vaga I.N., Motkova T.Yu. – collection and processing of material, statistical processing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

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

Funding. The study had no sponsorship.

Received: March 3, 2025 / Revised: April 8, 2025 / Accepted: June 26, 2025 / Published: July 31, 2025

Введение

Чрезмерные физические нагрузки во время работы нередко становятся причиной патологий опорно-двигательного аппарата (ОДА). К болезням опорно-двигательного аппарата приводят работы, связанные с поднятием и перемещением тяжестей, необходимостью длительного пребывания в фиксированной, вынужденной или неудобной рабочей позе, наклонами корпуса, длительно поднятыми над головой руками или множеством однообразных повторяющихся движений [1]. Профессиональная заболеваемость, связанная с воздействием физического перенапряжения и перегрузок отдельных систем и органов, в 2023 г. занимает второе ранговое место в структуре профессиональной патологии в зависимости от воздействия производственного фактора и составляет 26,47% [2]. Одним из возможных способов предотвращения перенапряжения и снижения степени утомления является применение промышленного экзоскелета [3–7]. Сотрудниками ФГБНУ «НИИ МТ» было проведено исследование утомления по динамике показателей функционального состояния скелетной мускулатуры работника при использовании им промышленного экзоскелета, разработанного компанией ПАО «Интелтех» и предназначенного, по заявлению производителя, для снижения нагрузки на мышцы спины и рук, а также перемещения груза массой до 50 кг. Объектом исследования была динамика функционального состояния организма человека при выполнении физической работы с применением промышленного экзоскелета (ПЭ).

Цель исследования – оценка эффективности применения промышленного экзоскелета для снижения утомления в условиях моделирования трудовой деятельности. В задачи исследования входило сравнение показателей утомления, полученных с помощью методик электромиографии (ЭМГ) [8–12], миоэлектронетрии (МТМ) [13–19], анкетирования при моделировании трудовой деятельности с применением промышленного экзоскелета и без него.

Материалы и методы

В рамках исследования оценивали промышленный экзоскелет ProExo (комплектация Boost), предназначенный для разгрузки мышц спины и рук при подъеме, опускании, переносе и удерживании грузов массой до 50 кг. Масса образца – 2,8 кг. Исследование проводилось на базе клиники ФГБНУ «НИИ МТ». К участию в исследовании привлекали практически здоровых мужчин в возрасте от 18 до 45 лет. Критерии отбора: отсутствие патологий со стороны желудочно-кишечного тракта, печени, почек, сердечно-сосудистой системы, дыхательной системы, нервной системы, опорно-двигательного аппарата, острых инфекционных болезней и состояний помрачения сознания. Добровольцы получали необходимую информацию о ходе исследования, рисках, своих правах и возможностях в доступной форме и подписывали добровольное информированное согласие на участие в исследовании.

Дизайн соответствовал одноцентровому рандомизированному кроссоверному контролируемому исследованию. Для снижения влияния адаптации к физической нагрузке на результаты было проведено рандомизированное распределение добровольцев на группы, которые по очереди моделировали трудовую деятельность (МТД) в экзоскелете и без него. Один из этапов (*без применения промышленного экзоскелета*) рассматривался как контрольная группа и был обозначен в дальнейшем как группа I, а этап с применением промышленного экзоскелета был обозначен как группа II. Рандомизация проводилась методом случайной выборки.

Моделирование рабочего цикла осуществлялось следующим образом: на полу, на расстоянии 5 м от испытательного стенда, располагался ящик с утяжелителем массой 25 кг внутри. На испытательном стенде на высоте 0,8 м от пола был закреплён горизонтальный модуль, представляющий собой рабочую поверхность. Рабочий цикл добровольца включал следующие действия:

- 1) подъём груза массой 25 кг с пола и перемещение его на расстояние 5 м;
- 2) наклон корпуса вперёд на 20–40° от вертикали с удержанием груза в руках в течение 5 с;
- 3) распрямление корпуса и опускание груза на рабочую поверхность высотой 0,8 м;
- 4) после пятисекундной паузы следовали подъём груза с рабочей поверхности, перемещение его на расстояние 5 м, опускание на пол.

Выполнение данной работы проходило в соответствии с циклограммой эксперимента: 90 мин работы, 10 мин отдыха, 90 мин работы.

Показатели поверхностной ЭМГ регистрировали с помощью системы комплексной объективной оценки нервно-мышечной функции «Биомеханика Биокинект» (ООО «Неврокор», Москва). Поверхностные биполярные электроды располагали на расстоянии 2 см друг от друга в области проекций мышц (плечевой, двуглавой мышц и латерального пучка трехглавой мышцы плеча, среднего пучка дельтовидной, верхней части трапецевидной, широчайшей, выпрямляющей позвоночник в области поясницы, прямой и двуглавой мышц бедра). ЭМГ-сигнал с мышц регистрировали в течение последней минуты выполнения трудовой деятельности как с применением ПЭ, так и без него. Для нормализации сигнала до начала проведения исследования вне МТД для каждой исследуемой мышцы был записан ЭМГ-сигнал при максимальном произвольном усилии (МПУ). Записи биоэлектрической активности задействованных в работе мышц во время выполнения моделируемой работы пересчитывали относительно их максимальной активности (% МПУ). Сравнивали % МПУ, полученные при выполнении работы с использованием и без использования ПЭ. В качестве показателя активности мышцы была взята средняя амплитуда кривой.

Миоэлектронетрию осуществляли с помощью прибора для неинвазивной пальпации MyotonPRO (MyotonAS, Эстония). Регистрировали биомеханические и вязкоупругие

Таблица 1 / Table 1

Результаты электромиографии добровольцев, *Me* (IQR)Results of electromyography in volunteers, *Me* (IQR)

Исследуемая мышца Studied muscle	% МПУ при выполнении работы % MVC while performing work		<i>n</i>
	группа I first group	группа II second group	
Поясничная область в проекции мышцы, выпрямляющей позвоночник справа The lumbar region in the projection of the muscle straightening the spine on the right	100.4 (93.9–114.7)	79.4 (55.3–107.8)	10
Поясничная область в проекции мышцы, выпрямляющей позвоночник слева The lumbar region in the projection of the muscle straightening the spine on the left	116.4 (97.0–130.0)	103.9 (83.3–113.6)	10
Верхняя часть трапецевидной мышцы справа / The upper part of the right trapezius muscle	24.8 (16.6–33.3)	18.1 (11.8–21.9)*	11
Верхняя часть трапецевидной мышцы слева / The upper part of the left trapezius muscle	36.4 (19.9–80.3)	25.3 (15.2–43.0)	11
Широчайшая мышца спины справа / The right latissimus dorsi muscle	22.8 (16.3–24.7)	13.2 (6.4–25.4)	11
Широчайшая мышца спины слева / The left latissimus dorsi muscle	25.9 (18.6–32.3)	16.0 (7.8–30.6)	11
Средний пучок дельтовидной мышцы справа / The middle bundle of the right deltoid muscle	16.3 (9.9–33.7)	8.4 (5.0–10.9)*	11
Средний пучок дельтовидной мышцы слева / The middle bundle of the left deltoid muscle	9.9 (8.0–16.4)	9.2 (4.2–11.3)	11
Двуглавая мышца плеча справа / Right biceps brachii	30.8 (14.8–41.8)	25.0 (14.9–42.1)	10
Двуглавая мышца плеча слева / Left biceps brachii	34.6 (28.1–49.3)	22.0 (17.2–24.9)*	8
Латеральный пучок трёхглавой мышцы плеча справа Lateral bundle of the triceps muscle of the right shoulder	6.8 (5.9–8.9)	7.2 (4.5–9.1)	11
Латеральный пучок трёхглавой мышцы плеча слева Lateral bundle of the triceps muscle of the left shoulder	5.5 (4.9–8.9)	6.1 (4.2–9.6)	11
Плечелучевая мышца справа / The right brachioradial muscle	35.3 (26.8–45.1)	19.5 (16.3–40.6)*	11
Плечелучевая мышца слева / The left brachioradial muscle	36.5 (22.6–58.5)	22.0 (22.6–58.5)*	11
Прямая мышца бедра справа / Right rectus femoris	9.9 (5.7–13.5)	9.1 (5.1–11.1)	9
Прямая мышца бедра слева / Left rectus femoris	13.9 (7.8–28.3)	7.7 (5.4–13.4)*	10
Длинная головка двуглавой мышцы бедра справа / The long head of the right double-headed thigh	20.7 (13.0–32.8)	23.3 (16.1–32.2)	11
Длинная головка двуглавой мышцы бедра слева / The long head of the left double-headed thigh	26.7 (16.8–38.5)	23.0 (15.0–29.5)	11

Примечание. Здесь и в табл. 2: *Me* – медиана значений показателя; IQR – интерквартильный размах, нижний квартиль 25% – верхний квартиль 75%; МПУ – максимальное произвольное усилие; *n* – число добровольцев; * – статистически значимые различия ($p \leq 0,05$).

Note: *Me* – the median of the index values; IQR – interquartile range, lower quartile 25% – upper quartile 75%; MVC – maximum voluntary contractions; *n* – the number of volunteers; * – statistically significant differences ($p \leq 0.05$).

характеристики мышц (тонус, жёсткость, декремент колебаний, обратно пропорциональный эластичности мышцы, время релаксации и ползучести), участвующих в поддержании рабочих поз и выполнении рабочих движений, с двух сторон. Измерения проводили двукратно: до начала МТД (фоновое тестирование) и сразу после его окончания (контрольное тестирование) как при использовании ПЭ, так и без него.

В процессе исследования фиксировали субъективную оценку добровольцами текущего локального напряжения. Анкетирование проводили каждые 15 мин. Для субъективной оценки локального напряжения применяли модифицированную десятибалльную шкалу Борга и карту областей тела для отражения наиболее задействованных в работе областей тела добровольцев.

Статистическую обработку результатов выполняли в пакетах прикладных программ Statistica 10.0 и MS Office Excel 2019. Была проведена проверка данных на нормальность распределения с помощью расчётных методов (критерий нормальности Колмогорова – Смирнова и Шапиро – Уилка). Непараметрические тесты (*W*-критерий Вилкоксона) использованы для сравнения результатов, полученных при выполнении работ с применением промышленного экзоскелета (группа II) и без него (группа I), и результатов, полученных до выполнения работ (фоновое тестирование) и после них (контрольное тестирование). Критический уровень значимости – $p \leq 0,05$.

Результаты

В исследовании принимали участие 12 практически здоровых мужчин в возрасте от 18 до 45 лет. На втором этапе один доброволец отказался от участия в испытаниях, поэтому число лиц, принимавших участие в исследовании эффективности применения данного ПЭ на протяжении первых 90 мин работы, – 12 человек (возраст 23 ± 3 года, рост $182,6 \pm 6$ см, масса тела $85,8 \pm 12,5$ кг), на протяжении второго 90-минутного рабочего цикла – 11 человек (возраст 23 ± 3 года, рост $183,4 \pm 5,6$ см, масса тела $86,7 \pm 12,7$ кг).

В статистический анализ данных, полученных при электромиографии, включали участки записи, не содержащие артефактов и выбросов. В зависимости от исследуемой мышцы число включённых в анализ результатов варьировалось от 8 до 11. Результаты ЭМГ представлены в табл. 1.

Сравнительный анализ полученных данных показал, что при выполнении работы с использованием ПЭ по сравнению с выполнением работы без него биоэлектрические активности трапецевидной мышцы справа статистически значимо снижаются на 26,9% ($p = 0,032$), дельтовидной мышцы справа – на 48,5% ($p = 0,005$), двуглавой мышцы плеча слева – на 36,4% ($p = 0,025$), плечелучевых мышц справа и слева – на 44,8% ($p = 0,02$) и 39,9% ($p = 0,005$) соответственно, прямой мышцы бедра слева – на 44,6% ($p = 0,009$). Анализ показателя остальных исследуемых мышц не выявил статистически значимых изменений.

Таблица 2 / Table 2

Результаты миоэлектромиграфии, *Me (IQR), n = 11*Myoelctromy results, *Me (IQR), n = 11*

Показатель Index	Исследуемая мышца Studied muscle	Группа I / First group		Группа II / Second group	
		фон pre-intervention testing	контроль post-intervention testing	фон pre-intervention testing	контроль post-intervention testing
Тонус, Гц Tone, Hz	Двуглавая мышца плеча справа Right biceps brachii	13.8 (12.8–14.7)	14.6* (13.7–15.5)	13.5 (13.1–15.3)	14.1 (13.7–14.6)
Жёсткость, Н/м Stiffness, N/m	Мышца, выпрямляющая спину справа The muscle straightening the back on the right	280.8 (249.2–297.9)	252.0* (216.5–292.4)	265.4 (236.8–287.5)	252.4 (220.4–277.1)
Эластичность Elasticity	Широчайшая мышца спины справа The latissimus dorsi muscle on the right	0.93 (0.88–1.03)	1.05* (1.01–1.13)	1.01 (0.92–1.16)	1.05 (0.95–1.26)
	Широчайшая мышца спины слева The latissimus dorsi muscle on the left	0.98 (0.89–1.09)	0.96* (0.94–1.15)	1.00 (0.86–1.10)	1.03 (0.88–1.16)
	Трапециевидная мышца слева Trapezius muscle on the left	0.94 (0.88–1.10)	1.02* (0.94–1.19)	0.94 (0.90–1.18)	0.98 (0.85–1.09)
Время релаксации, мсек Relaxation time, ms	Мышца, выпрямляющая спину справа The erector muscle of spine on the right	18.02 (17.33–19.94)	19.00* (18.24–22.13)	18.74 (17.55–20.23)	19.08 (18.42–21.130)
	Широчайшая мышца спины справа The latissimus dorsi muscle on the right	23.36 (19.33–24.78)	24.52* (22.58–25.47)	24.48 (21.10–26.53)	24.64 (20.9;8–25.26)
Ползучесть Creep	Мышца, выпрямляющая спину справа The erector muscle of spine on the right	1.08 (1.00–1.17)	1.13* (1.07–1.23)	1.09 (1.04–1.14)	1.12 (1.05–1.16)
	Широчайшая мышца спины справа The latissimus dorsi muscle on the right	1.34 (1.15–1.36)	1.43* (1.30–1.44)	1.29 (1.13–1.54)	1.44 (1.24–1.48)

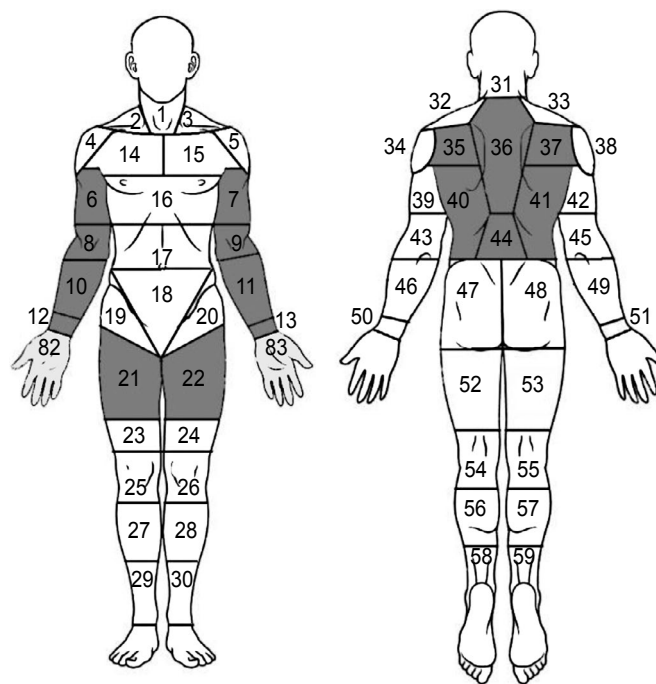
Таблица 3 / Table 3

Самооценка напряжения (усталости) добровольцев (*n*) при выполнении работы в промышленном экзоскелете (ПЭ) и без негоSelf-assessment of tension/fatigue in volunteers (*n*) with and without utilizing industrial exoskeleton (IE)

Область тела* Body areas*	Без ПЭ / without IE		С ПЭ / with IE	
	<i>n</i>	средний балл average score	<i>n</i>	средний балл average score
9	3	5.6	0	0.0
12	3	5.4	0	0.0
13	3	5.5	1	5.0
21	3	6.0	1	5.7
22	3	6.0	1	5.7
35	3	5.6	1	5.5
36	3	6.1	1	5.0
37	3	5.6	1	5.5
40	3	6.0	0	0.0
41	3	6.0	0	0.0
8	4	5.6	0	0.0
10	4	5.8	2	5.5
11	5	5.8	2	5.5
6	6	6.0	1	5.0
7	6	6.0	1	5.0
44	7	6.1	3	5.3
82	8	6.1	8	5.6
83	8	6.0	8	5.6

Примечание. * Области тела, указанные в таблице номера-ми, см. на рисунке.

Note: * See the figure for the body areas listed in the table.



- Снижение количества упоминаний областей по сравнению с работой без ПЭ
Decrease in the number of mentions of areas compared to work without IE
- Количество упоминаний областей не изменилось по сравнению с работой без ПЭ
The number of mentions of areas has not changed compared to work without IE

Области тела, в которых добровольцы отмечали напряжение (усталость) при работе в промышленном экзоскелете (ПЭ) (выше 5 по шкале Борга).

Areas of the body in which volunteers noted a feeling of tension/fatigue when working in industrial exoskeleton (IE) (above 5 on the Borg scale).

Результаты оценки влияния ПЭ на показатели скелетной мускулатуры, участвующей в поддержании рабочих поз и выполнении рабочих движений, с помощью миоэлектродграфии представлены в табл. 2.

Статистический анализ полученных данных показал, что тонус двуглавой мышцы плеча справа после выполнения работы без применения ПЭ был выше, чем до начала её выполнения, на 5,9% по медиане ($p = 0,03$); жёсткость мышцы, выпрямляющей спину справа, после выполнения работы без использования ПЭ была ниже, чем до её начала, на 10,3% по медиане ($p = 0,03$). Кроме того, эластичность мышечной ткани, обратно пропорциональная декременту колебаний, была ниже после выполнения работы без применения ПЭ у широчайшей мышцы спины справа и трапециевидной мышцы слева на 13,3 и 7,8% соответственно по медиане ($p = 0,04$ и $p = 0,05$) и выше у широчайшей мышцы спины слева на 1,6% ($p = 0,05$). Обнаружены изменения времени релаксации и ползучести мышцы, выпрямляющей спину справа (увеличение на 5,4 и 4,4% соответственно при $p = 0,01$), и широчайшей мышцы справа (увеличение на 5 и 7,3% соответственно при $p = 0,02$ и $p = 0,01$) после работы без применения ПЭ.

Результаты самооценки напряжения и утомления приведены в табл. 3. Из расчёта были исключены оценки от 4 и ниже, так как они не были информативны в связи с характеристикой напряжения как лёгкого и очень лёгкого. Области тела, обозначенные указанными в таблице номерами, отражены на рисунке.

При работе без ПЭ пользователи чаще всего отмечали ощущение напряжения (утомления) в следующих областях: передняя и задняя области плеча, передняя локтевая область, передняя область предплечья, передняя область запястья, передняя область бедра, лопаточная, подлопаточная и боковая области, грудная и поясничная области позвоночника, ладонные области кисти. В табл. 3 приведены данные по областям тела, о которых упоминали более 27% пользователей.

При работе в ПЭ во всех представленных случаях (кроме областей 82,83) число добровольцев, упоминающих об ощущении напряжения (утомления), снизилось в два раза и более, также уменьшились средние баллы из расчёта на одного добровольца, отражающие интенсивность напряжения (утомления).

Число добровольцев, упоминающих о напряжении (утомлении) в ладонных областях кисти как при работе с использованием ПЭ, так и без него, осталось неизменным, однако отмечается снижение интенсивности напряжения (утомления) при использовании ПЭ.

Необходимо отметить, при работе в ПЭ у одного добровольца увеличилось напряжение в задней области запястья, что, вероятно, носит индивидуальный характер.

Обсуждение

Результаты оценки влияния ПЭ на показатели скелетной мускулатуры, участвовавшей в поддержании рабочих поз и выполнении рабочих движений, с помощью ЭМГ демонстрировали, что при деятельности с применением ПЭ некоторые мышцы были в состоянии меньшего напряжения, чем при работе без ПЭ, что свидетельствует об их разгрузке за счёт использования данного ПЭ. Кроме того, не было выявлено ни одного случая повышения биоэлектрической активности исследуемых мышц в процессе работы с применением ПЭ, что также указывает на отсутствие негативного влияния его использования.

Выявленный факт статистически значимого снижения биоэлектрической активности плечелучевых мышц с обеих сторон при использовании ПЭ демонстрирует явное снижение физической нагрузки при выполнении моделируемых трудовых операций.

Изменения показателя среднего пучка дельтовидной и верхней части трапециевидной мышц только справа без

аналогичных изменений слева могут быть связаны с их наибольшей активацией во время выполнения работы, поскольку у большинства добровольцев ведущей рукой является правая, и вероятно, основная нагрузка распределялась на эту сторону. Кроме того, причиной могут быть индивидуальные анатомические особенности добровольцев и биомеханические характеристики их движений при осуществлении трудовых операций. Индивидуальными особенностями биомеханики движений добровольцев также, вероятнее всего, обусловлены односторонние изменения биоэлектрической активности двуглавой мышцы плеча и четырёхглавой мышцы бедра. Поскольку данные изменения не были симметричными, можно предположить, что при выполнении работы с ПЭ происходило перераспределение нагрузки на другие мышцы или анатомические области. Отсутствие существенных изменений биоэлектрической активности мышц спины при использовании ПЭ может быть связано с несколькими факторами: недостаточным влиянием использования ПЭ на данную область, перераспределением нагрузки на другие анатомические области из-за применения ПЭ, а также со сложностью проведения измерений ЭМГ-сигнала глубоко расположенных мышц. Последнее обстоятельство необходимо учитывать при проведении последующих ЭМГ-тестирований в аналогичных исследованиях.

Изменения, полученные в ходе МТМ-исследования, наблюдались только в группе добровольцев, осуществляющих работу без применения ПЭ, поэтому невозможно сделать вывод о влиянии использования данного ПЭ на биомеханические и вязкоупругие характеристики исследуемых мышц. Тем не менее можно предположить, что конструктивные особенности ПЭ не оказывают негативного влияния на измеряемые параметры. Отсутствие статистически значимых изменений показателей других мышц в остальных тестированиях может быть обусловлено низкой чувствительностью используемой методики в данном исследовании. Причина, возможно, кроется в недостаточной для выявления с помощью используемого оборудования степени мышечного утомления, развивающегося в результате выполнения моделируемой работы, а также в быстром восстановлении мышц до исходного состояния. Таким образом, данную особенность используемой методики следует учитывать при планировании и проведении последующих исследований, связанных с воздействиями физической нагрузки на скелетную мускулатуру.

Результаты анализа субъективной оценки локального напряжения указывают на то, что физическое напряжение добровольцев было ниже при работе в ПЭ по сравнению с работой без ПЭ.

Исследование имеет следующие ограничения. Участниками были 12 практически здоровых добровольцев мужского пола, что ограничивает возможности распространения результатов на генеральную выборку. Моделирование трудовой деятельности в лабораторных условиях не позволяет учесть все факторы, воздействующие на работника при использовании экзоскелета на производстве. Для более полной оценки эффективности промышленного экзоскелета необходим учёт динамики показателей систем кровообращения, дыхания и др.

Заключение

Результаты электромиографии указывают на снижение утомления при использовании промышленного экзоскелета в процессе моделирования трудовой деятельности в лабораторных условиях. Субъективные данные показали, что применение промышленного экзоскелета при выполнении трудовой деятельности, связанной с подъёмом и перемещением груза, снижает уровень напряжения скелетно-мышечной системы. Выявленные признаки уменьшения нагрузки на области предплечий, а также на некоторые мышцы плечевого пояса со стороны ведущей

руки в группе добровольцев, использующих при работе промышленный экзоскелет, могут быть расценены как положительный эффект его применения. Полученные результаты подтверждают эффективность применения про-

мышленного экзоскелета ProЕхo комплектации Boost при выполнении производственных операций, аналогичных представленной лабораторной модели трудовой деятельности.

Литература

(п.п. 3–12, 14–19 см. References)

1. Канонин Ю.Н., Тихомиров О.И. Перспективы применения промышленных экзоскелетов на железнодорожном транспорте в качестве средств индивидуальной защиты. *Известия Петербургского государственного университета путей сообщения*. 2024; 21(2): 370–9. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2024-02-370-379>
2. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2023 году». М.; 2024.

13. Шитова Е.С., Малахова И.С., Лемешко В.И. Возможность использования миотонометрии для оценки мышечного утомления работников физического труда. *Медицина труда и промышленная экология*. 2020; 60(11): 892–4. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-11-892-894> <https://elibrary.ru/ddgzka>

References

1. Kanonin Yu. N., Tikhomirov O. I. Prospects for the use of industrial exoskeletons in railway transport as personal protective equipment. *Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2024; 21(2): 370–9. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2024-02-370-379> (in Russian)
2. State report «About the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation in 2023». Moscow; 2024. (in Russian)
3. Geregei A.M., Shitova E.S., Malakhova I.S., Shuporin E.S., Bondaruk E.V., Efimov A.R., et al. Up-to-date techniques for examining safety and physiological efficiency of industrial exoskeletons. *Health Risk Analysis*. 2020; (3): 148–59. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.18.eng>
4. Bosch T., van Eck J., Knitel K., de Looze M. The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Appl. Ergon.* 2016; 54: 212–7. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.12.003>
5. Blanco A., Catalán J.M., Martínez-Pascual D., García-Pérez J.V., García-Aracil N. The effect of an active upper-limb exoskeleton on metabolic parameters and muscle activity during a repetitive industrial task. *IEEE Access*. 2022; 10: 16479–88. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3150104>
6. Qu X., Qu C., Ma T., Yin P., Zhao N., Xia Y., et al. Effects of an industrial passive assistive exoskeleton on muscle activity, oxygen consumption and subjective responses during lifting tasks. *PLoS One*. 2021; 16(1): e0245629. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245629>
7. De Looze M.P., Bosch T., Krause F., Stadler K.S., O'Sullivan L.W. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomic*. 2015; 59(5): 671–81. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988>
8. Maurice P., Camernik J., Gorjan D., Schirrmeyer B., Bornmann J., Tagliapietra L., et al. Objective and subjective effects of a passive exoskeleton on overhead work. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 2020; 28(1): 152–64. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2019.2945368>
9. Grimmer M., Quinlivan B.T., Lee S., Malcolm P., Rossi D.M., Siviý C., et al. Comparison of the human-exosuit interaction using ankle moment and ankle positive power inspired walking assistance. *J. Biomech.* 2019; 83: 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.11.023>
10. Masood J., Dacal-Nieto A., AlonsoRamos V., Fontano M.I., Voilqué A., Bou J. Industrial wearable exoskeletons and exosuits assessment process. In: Carrozza M., Micera S., Pons J., eds. *Wearable Robotics: Challenges and Trends*. Cham: 2018: 234–8. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01887-0_45
11. Chen G., Wu J., Chen G., Lu Y., Ren W., Xu W., et al. Reliability of a portable device for quantifying tone and stiffness of quadriceps femoris and patellar tendon at different knee flexion angles. *PLoS One*. 2019; 14(7): e0220521. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220521>
12. Lo W.L.A., Yu Q., Mao Y., Li W., Hu C., Li L. Lumbar muscles biomechanical characteristics in young people with chronic spinal pain. *BMC Musculoskeletal Disord.* 2019; 20(1): 559. <https://doi.org/10.1186/s12891-019-2935-z>
13. Shitova E.S., Malakhova I.S., Lemesheko V.I. The possibility of using myotonometry to assess the muscle fatigue of physical labor workers. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2020; 60(11): 892–4. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-11-892-894> <https://elibrary.ru/ddgzka> (in Russian)
14. Liu Y., Pan A., Hai Y., Li W., Yin L., Guo R. Asymmetric biomechanical characteristics of the paravertebral muscle in adolescent idiopathic scoliosis. *Clin. Biomech. (Bristol)*. 2019; 65: 81–6. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2019.03.013>
15. Chen G., Wu J., Chen G., Lu Y., Ren W., Xu W., et al. Reliability of a portable device for quantifying tone and stiffness of quadriceps femoris and patellar tendon at different knee flexion angles. *PLoS One*. 2019; 14(7): e0220521. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220521>
16. Mänttari S., Rauttolu A.P., Halonen J., Karkulehto J., Säynäjäkangas P., Oksa J. Effects of an exoskeleton on muscle activity in tasks requiring arm elevation: Part I – Experiments in a controlled laboratory setting. *Work*. 2024; 77(4): 1179–88. <https://doi.org/10.3233/WOR-230217>
17. Kopecká B., Ravník D., Jelen K., Bittner V. Objective methods of muscle tone diagnosis and their application – a critical review. *Sensors (Basel)*. 2023; 23(16): 7189. <https://doi.org/10.3390/s23167189>
18. Mänttari S., Rauttolu A.P., Halonen J., Karkulehto J., Säynäjäkangas P., Oksa J. Effects of upper-limb exoskeleton on muscle strain in tasks requiring arm elevation: Part I – experiments in controlled laboratory setting with different shoulder angles; 2022. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4299796>
19. Zheng L., Lowe B., Hawke A.L., Wu J.Z. Evaluation and test methods of industrial exoskeletons *in vitro*, *in vivo*, and *in silico*: a critical review. *Crit. Rev. Biomed. Eng.* 2021; 49(4): 1–13. <https://doi.org/10.1615/critrevbiomedeng.2022041509>

Сведения об авторах

Шупорин Евгений Сергеевич, и.о. зав. лаб. средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов ФГБНУ «НИИ МТ», 105275, Москва, Россия.
Чудова Елена Станиславовна, мл. науч. сотр. лаб. средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов ФГБНУ «НИИ МТ», 105275, Москва, Россия.
Ильенко Олег Владимирович, мл. науч. сотр. лаб. средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов ФГБНУ «НИИ МТ», 105275, Москва, Россия.
Вага Иван Николаевич, инженер лаб. средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов ФГБНУ «НИИ МТ», 105275, Москва, Россия.
Моткова Татьяна Юрьевна, техник лаб. средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов ФГБНУ «НИИ МТ», 105275, Москва, Россия.

Information about the authors

Evgeniy S. Shuporin, Acting Head of the Laboratory and Researcher at the Laboratory for Personal Protective Equipment and Industrial Exoskeletons, Izmerov Research Institute of Occupational Health, Moscow, 105275, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7590-431X> E-mail: ppe-lab@irioh.ru
Elena S. Chudova, Junior researcher at the Laboratory for Personal Protective Equipment and Industrial Exoskeletons, Izmerov Research Institute of Occupational Health, Moscow, 105275, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0004-2746-2915>
Oleg V. Ilyenko, Junior researcher at the Laboratory for Personal Protective Equipment and Industrial Exoskeletons, Izmerov Research Institute of Occupational Health, Moscow, 105275, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0000-9760-8685>
Ivan N. Vaga, Engineer at the Laboratory for Personal Protective Equipment and Industrial Exoskeletons, Izmerov Research Institute of Occupational Health, Moscow, 105275, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0004-2765-145X>
Tatyana Yu. Motkova, Technician at the Laboratory for Personal Protective Equipment and Industrial Exoskeletons, Izmerov Research Institute of Occupational Health, Moscow, 105275, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0006-6287-918X>