



Оценка эффективности применения промышленного экзоскелета по уровню энерготрат добровольцев

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

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», пр-т Буденного, д. 31, г. Москва, 105275, Российская Федерация

Резюме

Введение. Для оценки эффективности применения промышленного экзоскелета необходимо исследовать динамику функционального состояния организма человека при выполнении физической работы с применением промышленного экзоскелета, в частности динамику энерготрат.

Цель исследования: оценка уровня энерготрат при применении промышленного экзоскелета в условиях моделирования трудовой деятельности.

Материалы и методы. Проводилось исследование эффективности применения промышленного экзоскелета для трудовой деятельности, включающей в себя подъем, перемещение и удержание груза, путем ее моделирования в лабораторных условиях с использованием промышленного экзоскелета. 12 добровольцев были распределены на две группы, которые поочередно выполняли производственные операции с экзоскелетом и без него. Состояние добровольцев оценивалось с помощью врачебного осмотра и эргоспирометрии. Полученные данные обрабатывались с помощью статистического анализа, проведенного с применением пакета прикладных программ Statistica 10.0 и MS Office Excel 2019.

Результаты. Показатели состояния сердечно-сосудистой системы добровольцев на протяжении исследования были в пределах референтных значений и соответствовали интенсивности физической нагрузки. В группе, работающей с применением экзоскелета, по сравнению с контрольной группой, были отмечены статистически значимое увеличение показателя частоты дыхания через первые 30 минут на 8 %, через 60 минут – на 17 %, через 90 минут – на 21 %, через 120 минут – на 12 %, через 150 минут – на 7 %, через 180 минут – на 8 % и уменьшение значений показателей метаболического эквивалента через 60 минут – на 4 % и через 90 минут – на 6 %, объема выдыхаемого кислорода через 60 минут – на 6 % и через 90 минут – на 3 % и объема выделяемого углекислого газа через 150 минут – на 6 %.

Выводы. Полученные данные свидетельствуют об эффективности использования промышленного экзоскелета для снижения энерготрат работника при выполнении производственных операций аналогичных разработанной лабораторной модели трудовой деятельности.

Ключевые слова: промышленный экзоскелет, эффективность труда, эргоспирометрия, функциональное состояние, средства индивидуальной защиты.

Для цитирования: Шупорин Е.С., Чудова Е.С., Ильенко О.В., Вага И.Н., Моткова Т.Ю. Оценка эффективности применения промышленного экзоскелета по уровню энерготрат добровольцев // Здоровье населения и среда обитания. 2025. Т. 33. № 6. С. 58–64. doi: 10.35627/2219-5238/2025-33-6-58-64

Evaluation of the Efficiency of Applying an Industrial Exoskeleton by Energy Expenditures of Volunteers

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

Izmerov Research Institute of Occupational Health, 31 Budenny Avenue, Moscow, 105275, Russian Federation

Summary

Introduction: To assess the efficiency of applying an industrial exoskeleton, it is necessary to study changes in the functional state of the human body when performing physical work using the device and, namely, the dynamics of energy expenditures.

Objective: To evaluate energy expenditures when using an industrial exoskeleton in a work simulation.

Materials and methods: We tested the efficiency of applying an industrial exoskeleton in work activities, including lifting, moving and holding loads, by modeling them in laboratory conditions. In doing so, 12 volunteers were divided into two groups, which alternately performed production operations with and without the exoskeleton. Their condition was assessed by means of a medical examination and ergospirometry. The data obtained were analyzed using Statistica 10.0 and MS Office Excel 2019.

Results: The parameters of the cardiovascular system of the volunteers throughout the study were within the reference values and compliant with intensity of the physical activity. In the exoskeleton group, compared with the controls, we observed a statistical increase in the respiratory rate by 8 % after the first 30 minutes, by 17 % after 60 minutes, by 21 % after 90 minutes, by 12 % after 120 minutes, by 7 % after 150 minutes, and by 8 % after 180 minutes, as well as a decrease in values of the metabolic equivalent by 4 % after 60 minutes and by 6 % after 90 minutes, in the volume of inhaled oxygen by 6 % after 60 minutes and by 3 % after 90 minutes, and in the volume of exhaled carbon dioxide by 6 % after 150 minutes.

Conclusions: Our findings demonstrate the efficiency of applying the industrial exoskeleton to reduce workers' energy expenditures when performing production operations similar to the work activities modeled.

Keywords: industrial exoskeleton, productivity, ergospirometry, functional state, personal protective equipment.

Cite as: Shuporin ES, Chudova ES, Ilyenko OV, Vaga IN, Motkova TYu. Evaluation of the efficiency of applying an industrial exoskeleton by energy expenditures of volunteers. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2025;33(6):58–64. (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2025-33-6-58-64

Введение. Чрезмерные физические нагрузки во время работы нередко становятся причиной заболеваний опорно-двигательного аппарата (ОДА).

К заболеваниям опорно-двигательного аппарата приводят работы, связанные с поднятием и перемещением тяжестей, необходимостью длительного пребывания в фиксированной, вынужденной или неудобной рабочей позе, с наклонами корпуса, с длительно поднятыми над головой руками или большим количеством 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 %¹.

Одним из возможных вариантов решения проблемы является применение средств индивидуальной защиты опорно-двигательного аппарата – промышленных экзоскелетов. Их задачей является снижение нагрузки на костно-мышечную систему. Однако для того, чтобы рекомендовать использование промышленного экзоскелета как средства индивидуальной защиты, необходимо изучение эффективности его применения при выполнении конкретных производственных операций на определенном рабочем месте. Одним из основных показателей, применяемых для оценки эффективности использования промышленного экзоскелета, является уровень энерготрат, измеряемый при выполнении работы с экзоскелетом и без него [2–12]. Для анализа уровня энерготрат оптимальным представляется использование методов эргоспирометрии и анализа сердечного ритма [13–19].

Таким образом, с целью оценки уровня энерготрат при применении промышленного экзоскелета в условиях моделирования трудовой деятельности было принято решение провести научно-исследовательскую работу, объектом которой являлась динамика функционального состояния организма человека при выполнении физической работы с применением промышленного экзоскелета. В задачи исследования входило сравнение показателей энерготрат, полученных с помощью методов эргоспирометрии и анализа сердечного ритма, при выполнении трудовой деятельности в промышленном экзоскелете и без него.

Материалы и методы. Сотрудниками ФГБНУ «НИИ МТ» было проведено исследование уровня энергетических затрат работника при использовании промышленного экзоскелета, разработанного компанией ПАО «Интелтех» и предназначенного для снижения нагрузки на мышцы спины и рук, а также перемещения груза массой до 50 кг. Исследование проводилось в сентябре – ноябре 2023 года на базе клиники ФГБНУ «НИИ МТ».

Для изучения влияния использования промышленного экзоскелета (ПЭ) на уровень энерготрат работника был использован ПЭ ProEco комплекта-

ция 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 было проведено с соблюдением протокола «Исследование безопасности и эффективности применения промышленного экзоскелета», одобренного Локальным этическим комитетом ФГБНУ «НИИ МТ» (протокол № 1 заседания Локального этического комитета от 25.01.2023). От всех участников исследования было получено добровольное информированное согласие.

Было проведено рандомизированное кросс-верное контролируемое исследование.

В ходе исследования была разработана лабораторная модель трудовой деятельности в соответствии с хронометражем деятельности работника физического труда.

Были рассчитаны количество наклонов и суммарная масса грузов, чтобы итоговый класс тяжести разрабатываемой лабораторной модели трудовой деятельности (ЛМТД) соответствовал классу не ниже 3.1 (вредные условия труда)².

Эксперимент включал в себя моделирование трудовой деятельности (МТД) на протяжении 3 часов с одним 10-минутным перерывом через 90 минут работы.

В рамках моделирования рабочего места на полу, на расстоянии 5 м от испытательного стенда, располагался ящик с утяжелителем внутри, массой 25 кг. На испытательном стенде на высоте 0,8 м от пола был закреплен горизонтальный модуль, представляющий собой рабочую поверхность. Доброволец должен был осуществлять следующие действия:

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

К участию в исследовании привлекались мужчины в возрасте от 18 до 45 лет с отсутствием патологии со стороны желудочно-кишечного тракта, печени, почек, сердечно-сосудистой системы, дыхательной системы, нервной системы, опорно-двигательного аппарата, острых инфекционных заболеваний и состояний помрачения сознания.

На протяжении первых 90 минут работы в исследовании принимало участие 12 человек (в возрасте 23 ± 3 года, ростом $182,6 \pm 6,0$ см, массой тела $85,8 \pm 12,5$ кг), на протяжении второго 90-минутного рабочего цикла – 11 человек (в возрасте 23 ± 3 года, ростом $183,4 \pm 5,6$ см, массой тела $86,7 \pm 12,7$ кг) в связи с отказом одного из добровольцев продолжать участие в исследовании. Все участники выполняли

¹ О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2023 году: Государственный доклад. Москва: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2024. 364 с.

² Р 2.2.2006–05 «Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда».

трудовую деятельность с использованием промышленного экзоскелета и без него. Для того чтобы снизить влияние адаптации к физической нагрузке на результаты, добровольцы были распределены на две группы методом случайной выборки. Одна из групп сначала выполняла моделирование трудовой деятельности в промышленном экзоскелете, а потом без него, другая группа – наоборот. В итоге все добровольцы принимали участие в обоих условиях исследования.

Для определения валового обмена (энерготрат) добровольцев в ходе МТД осуществляли регистрацию показателей газообмена и основных показателей состояния кардио-респираторной системы (КРС) с использованием портативного комплекса для эргоспирометрического (ЭСМ) тестирования Metamax 3B (Cortex, Германия) и монитора сердечного ритма Polar H10 (Polar Electro, Финляндия). Регистрировали частоту сердечных сокращений (ЧСС), частоту дыхания, дыхательный объем, объемы вдыхаемого кислорода V_{O_2} и выделяемого углекислого газа V_{CO_2} . На их основе осуществляли расчет метаболического эквивалента (MET) и общих энерготрат организма (TMR – Total Metabolic Rate) по модифицированной формуле Вейера (Weir). Динамику значений энерготрат анализировали по динамике значений WMR (рабочая прибавка). В анализ не были включены данные, содержащие некорректное отображение результатов, не позволяющих провести их обработку.

Определение рабочей прибавки (WMR) рассчитывали по формуле (1):

$$WMR \text{ (ккал/час)} = TMR - RMR, \quad (1)$$

где WMR (Metabolic Rate of Work) – рабочая прибавка; TMR (Total Metabolic Rate) – общие энерготраты организма;

RMR (Resting Metabolic Rate) – энерготраты в покое.

Для определения RMR до начала МТД осуществляли регистрацию показателей газообмена добровольцев в состоянии покоя (лежа на кушетке). Показатели газообмена и основные показатели состояния КРС регистрировались непрерывно на протяжении всего времени МТД.

Статистическая обработка результатов осуществлялась с применением пакета прикладных программ Statistica 10.0 и MS Office Excel 2019. Производилась проверка данных на нормальность распределения с помощью расчетных методов (критерий нормальности Колмогорова – Смирнова и Шапиро – Уилка. При анализе данных использовались параметры медианы и интерквартильного размаха, Me (IQR). Для сравнения результатов, полученных в покое и в разные временные промежутки в ходе выполнения трудовой деятельности, а также для сравнения результатов, полученных при МТД в промышленном экзоскелете и без него, использовали W -критерий Вилкоксона. Критический уровень значимости – $p \leq 0,05$.

Ограничения исследования. Ограничениями пилотного исследования может являться то, что в исследовании приняли участие всего 12 мужчин,

что может являться нерепрезентативной выборкой и затруднять распространение результатов на генеральную совокупность. Оценка уровня энерготрат производилась в лабораторных условиях. При моделировании трудовой деятельности были воспроизведены только те воздействующие на работников на производстве факторы, от которых защищает промышленный экзоскелет. Для получения более комплексных данных об эффективности применения промышленного экзоскелета необходимо также оценивать показатели других систем организма, в частности скелетно-мышечной системы.

Результаты. Показатели, полученные с помощью эргоспирометрии в различные временные интервалы в ходе моделирования трудовой деятельности, представлены в таблице.

Для оценки влияния ПЭ на динамику энерготрат работника при нахождении в рабочих позах и выполнении рабочих движений сравнивали динамику значений показателей при работе с применением промышленного экзоскелета и без него.

Сравнительный анализ полученных данных показал наличие статистически значимых изменений между значениями некоторых показателей добровольцев разных групп.

Было отмечено увеличение значений частоты дыхания при выполнении работ с применением промышленного экзоскелета по сравнению с результатами, полученными при выполнении работ без него через 30 минут от начала МТД на 8 % ($p = 0,021$), через 60 минут – на 17 % ($p = 0,013$), через 90 минут – на 21 % ($p = 0,026$), через 120 минут – на 12 % ($p = 0,005$), через 150 минут – на 7 % ($p = 0,029$), через 180 минут – на 8 % ($p = 0,020$).

Показатели дыхательного объема, напротив, снизились при выполнении работ с применением промышленного экзоскелета через 30 минут от начала МТД на 3 % ($p = 0,005$), через 60 минут – на 8 % ($p = 0,002$), через 90 минут – на 12 % ($p = 0,008$), через 120 минут – на 13 % ($p = 0,005$), через 150 минут – на 11 % ($p = 0,003$), через 180 минут – на 8 % ($p = 0,005$) по отношению к показателям, продемонстрированным контрольной группой.

Значения показателя метаболического эквивалента были статистически значимо ниже при выполнении работ с промышленным экзоскелетом через 60 минут моделирования трудовой деятельности – на 4 % ($p = 0,046$) и через 90 минут МТД – на 6 % ($p = 0,048$), чем значения, показанные при работе без ПЭ.

Кроме того, при использовании промышленного экзоскелета объем вдыхаемого кислорода V_{O_2} был значимо меньше, чем при выполнении работ без ПЭ, через 60 минут – на 6 % ($p = 0,050$) и через 90 минут – на 3 % ($p = 0,051$).

Также стоит отметить уменьшение значений показателя выделяемого углекислого газа V_{CO_2} при использовании промышленного экзоскелета через 150 минут моделирования трудовой деятельности – на 6 % ($p = 0,012$) по отношению к показателям, полученным через 150 минут выполнения производственных операций без промышленного экзоскелета.

Таблица. Динамика энерготрат и показателей состояния КРС добровольцев в процессе МТД, Ме (IQR)
Table. Dynamics of energy expenditure and parameters of the cardiorespiratory system in the volunteers during modeled work activities, Me (IQR)

Показатель, ед. изм. / Parameter, units	Временной интервал МТД / Time interval of work activity modeling						
	В покое / At rest n = 12	0–30 мин. / min n = 11–12	30–60 мин. / min n = 11–12	60–90 мин. / min n = 10–11	90–120 мин. / min n = 11	120–150 мин. / min n = 11	150–180 мин. / min n = 10
Выполнение работы без ПЭ / Working without the industrial exoskeleton							
ЧСС, уд./мин. / Heart rate, beats per min	72 (65–80)	126 (112–127)	121 (116–131)	124 (114–134)	117 (114–120)	124 (119–130)	127 (115–131)
Частота дыхания, дд/мин. / Respiratory rate, breaths per min	14 (12–15)	24 (22–27)	24 (21–29)	24 (23–29)	25 (22–26)	27 (23–29)	26 (22–30)
Дыхательный объем, л / Tidal volume, L	0,76 (0,64–0,99)	1,37 (1,30–1,61)	1,39 (1,26–1,65)	1,37 (1,20–1,65)	1,45 (1,21–1,63)	1,41 (1,21–1,58)	1,34 (1,21–1,58)
Метаболический эквива- лент (MET) / Metabolic equivalent (MET)	–	4,2 (3,8–4,5)	4,1 (3,8–4,6)	4,4 (4,1–4,7)	4,2 (3,7–4,6)	4,4 (3,9–4,8)	4,4 (3,9–4,7)
Объем вдыхаемого кисло- рода V _{O₂} , л/мин / Volume of inhaled oxygen V _{O₂} , L/min	0,35 (0,32–0,40)	1,21 (1,10–1,32)	1,25 (1,10–1,34)	1,25 (1,17–1,31)	1,20 (1,14–1,28)	1,27 (1,16–1,35)	1,27 (1,22–1,32)
Объем выдыхаемого угле- кислого газа V _{CO₂} , л/мин / Volume of exhaled carbon dioxide V _{CO₂} , L/min	0,34 (0,26–0,41)	1,06 (0,97–1,16)	1,08 (0,98–1,11)	1,06 (1,03–1,18)	1,01 (0,94–1,08)	1,06 (0,99–1,18)	1,03 (0,99–1,07)
Рабочая прибавка (WMR), ккал/ч / Work metabolic rate (WMR), kcal per hour	–	238 (223–278)	255 (222–282)	255 (231–283)	242 (223–263)	355 (322–379)	365 (322–391)
Выполнение работы с ПЭ / Working with the industrial exoskeleton							
ЧСС, уд./мин. / Heart rate, beats per min	69 (65–78)	115 (100–133)	122 (108–134)	121 (109–136)	118 (105–132)	119 (112–137)	122 (111–140)
Частота дыхания, дд/мин. / Respiratory rate, breaths per min	15 (14–19)	26 (23–31)*	28 (25–34)*	29 (23–35)*	28 (26–31)*	29 (28–32)*	29 (25–33)*
Дыхательный объем, л / Tidal volume, L	0,66 (0,47–0,82)	1,33 (1,15–1,57)*	1,28 (1,10–1,45)*	1,26 (1,09–1,40)*	1,24 (1,10–1,42)*	1,25 (1,11–1,38)*	1,19 (1,08–1,42)*
Метаболический эквива- лент (MET) / Metabolic equivalent (MET)	–	4,1 (3,5–4,3)	4,0 (3,5–4,2)*	4,3 (3,7–4,5)*	4,0 (3,9–4,3)	4,0 (3,7–4,5)	4,0 (3,9–4,5)
Объем вдыхаемого кисло- рода V _{O₂} , л/мин / Volume of inhaled oxygen V _{O₂} , L/min.	0,33 (0,28–0,37)	1,16 (1,07–1,28)	1,17 (1,09–1,30)*	1,21 (1,12–1,28)*	1,22 (1,11–1,35)	1,29 (1,11–1,31)	1,29 (1,08–1,34)
Объем выдыхаемого угле- кислого газа V _{CO₂} , л/мин / Volume of exhaled carbon dioxide V _{CO₂} , L/min.	0,30 (0,26–0,38)	1,07 (0,95–1,16)	1,04 (0,97–1,09)	1,03 (0,94–1,12)	1,00 (0,95–1,07)	1,00 (0,93–1,06)*	1,02 (0,87–1,10)
Рабочая прибавка (WMR), ккал/ч / Work metabolic rate (WMR), kcal per hour	–	234 (213–304)	239 (216–264)	255 (215–269)	243 (225–281)	342 (317–376)	346 (321–372)

Примечание: n – количество добровольцев; Me – медиана показателя; IQR – интерквартильный размах, нижний квартиль 25 % – верхний квартиль 75 %; * – статистически значимые различия по сравнению со значениями показателей полученных при выполнении работы без ПЭ (p ≤ 0,05).

Notes: n, number of volunteers; Me, median; IQR, interquartile range, lower quartile (25 %) – upper quartile (75 %); *p ≤ 0.05, obtained during operation without industrial exoskeleton

В остальных случаях статистически значимых различий не было выявлено.

Обсуждение. Показатели сердечно-сосудистой системы добровольцев во всех тестированиях находились в пределах референтных значений и были адекватны физической нагрузке.

Статистически значимое увеличение показателя частоты дыхания и уменьшение показателя дыхательного объема при работе с применением промышленного

экзоскелета на протяжении всего моделирования трудовой деятельности, вероятно, свидетельствуют о том, что конструктивные особенности ПЭ вызывали ограничение экскурсии грудной клетки добровольцев.

Выявленное статистически значимое уменьшение значений показателей метаболического эквивалента (MET), объема вдыхаемого кислорода V_{O₂} (во временных интервалах 30–60 и 60–90 минут от начала МТД) и объема выделяемого углекислого

газа V_{CO_2} (во временном интервале 120–150 минут от начала МТД) наблюдалось при выполнении производственных операций с применением ПЭ по сравнению с результатами, полученными при выполнении работ без ПЭ, что свидетельствует о снижении нагрузки на кардиореспираторную систему при использовании промышленного экзоскелета. Показатель MET также показывает, что интенсивность физической нагрузки была умеренной, т. к. значения показателя за все время моделирования трудовой деятельности у добровольцев не превышали в среднем 4,4.

Выводы

1. В исследовании была разработана лабораторная модель трудовой деятельности для оценки эффективности использования промышленного экзоскелета по энерготратам работника.

2. Увеличение частоты дыхания и уменьшение дыхательного объема в группе, работающей с применением промышленного экзоскелета, по сравнению с группой, не использующей ПЭ, может указывать на ограничение экскурсии грудной клетки добровольцев при использовании промышленного экзоскелета за счет его конструктивных особенностей.

3. Более низкие показатели энерготрат в группе, использующей промышленный экзоскелет, по сравнению с группой, выполняющей трудовую деятельность без него, указывают на то, что использование экзоскелета помогает снизить нагрузку на кардиореспираторную систему.

4. Полученные данные свидетельствуют об эффективности использования промышленного экзоскелета для снижения энергетических затрат работника при выполнении производственных операций, аналогичных разработанной лабораторной модели трудовой деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Т. 21. № 2. С. 370–379. doi: 10.20295/1815-588X-2024-02-370-379
2. Schmalz T, Schändlinger J, Schuler M, et al. Biomechanical and metabolic effectiveness of an industrial exoskeleton for overhead work. *Int J Environ Res Public Health*. 2019;16(23):4792. doi: 10.3390/ijerph16234792
3. Blanco A, Catalán JM, Martínez-Pascual D, García-Pérez JV, 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;10:16479-16488. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3150104
4. Qu X, Qu C, Ma T, 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. doi: 10.1371/journal.pone.0245629
5. Geregei AM, Shitova ES, Malakhova IS, et al. Up-to-date techniques for examining safety and physiological efficiency of industrial exoskeletons. *Health Risk Analysis*. 2020;(3):147-158. doi: 10.21668/health.risk/2020.3.18.eng
6. Мальчиков А.В., Яцун А.С., Белов А.Ю., Репкин А.В. Анализ эффективности применения экзоскелета в производственном процессе промышленного предприятия // Юность и знания – гарантия успеха. 2019 : сборник научных трудов 6-й Международной молодежной научной конференции, Курск, 18–19 сентября 2019 года / Курск: Юго-Западный государственный университет. 2019. Т. 3. С. 234–237. EDN NOVULK.
7. Орлов И.А., Алисейчик А.П., Меркулова А.Г., Комарова С.В., Белая О.В., Грибков Д.А. и др. Актуальность использования промышленных экзоскелетов для снижения количества профессиональных заболеваний опорно-двигательного аппарата верхней части тела // Медицина труда и промышленная экология. 2019. № 7. doi:10.31089/1026-9428-2019-59-7-412-416
8. 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. № 14 (4). С. 78–97. doi: 10.21869/2223-1536-2024-14-4-78-97
9. Гереегей А.М., Глухов Д.В., Ефимов А.Р. Промышленные экзоскелеты. Нормативно-методическое регулирование // Медицина труда и промышленная экология. 2019. № 9. С. 598–598. doi: 10.31089/1026-9428-2019-59-9-598-599
10. Hoffmann N, Prokop G, Weidner R. Methodologies for evaluating exoskeletons with industrial applications. *Ergonomics*. 2021;65(2):276–295. doi: 10.1080/00140139.2021.1970823
11. Theurel J, Desbrosses K. Occupational exoskeletons: Overview of their benefits and limitations in preventing work-related musculoskeletal disorders. *IIEE Trans Occup Ergon Hum Factors*. 2019;7(3–4):264–280. doi: 10.1080/24725838.2019.1638331
12. Lowe BD, Billotte WG, Peterson DR. ASTM F48 formation and standards for industrial exoskeletons and exosuits. *IIEE Trans Occup Ergon Hum Factors*. 2019;7(3–4):230–236. doi: 10.1080/24725838.2019.1579769
13. Hefferle M, Lechner M, Kluth K, Christian M. Development of a standardized ergonomic assessment methodology for exoskeletons using both subjective and objective measurement techniques. In: Chen J, ed. *Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems. AHFE 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham; 2020;962. doi: 10.1007/978-3-030-20467-9_5
14. Reimeir B, Calisti M, Mittermeier R, Ralfs L, Weidner R. Effects of back-support exoskeletons with different functional mechanisms on trunk muscle activity and kinematics. *Wearable Technol*. 2023;4:e12. doi: 10.1017/wtc.2023.5
15. Falcone T, Del Ferraro S, Molinaro V, Zollo L, Lenzuni P. Estimation of the metabolic rate in the occupational field: A regression model using accelerometers. *Int J Ind Ergon*. 2023;96:103454. doi: 10.1016/j.ergon.2023.103454
16. Maurice P, Čamernik J, Gorjan D, et al. Objective and subjective effects of a passive exoskeleton on overhead work. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2020;28(1):152–164. doi: 10.1109/TNSRE.2019.2945368
17. Гамза Н.А., Гринь Г.Р., Жукова Т.В. // Функциональные пробы в спортивной медицине. Минск: Белорусский государственный университет физической культуры; 2012. 57 с.

<https://doi.org/10.35627/2219-5238/2025-33-6-58-64>
Original Research Article

18. Weir JB. New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J Physiol.* 1949;109(1-2):1-9. doi: 10.1113/jphysiol.1949.sp004363
19. Mansell PI, Macdonald IA. Reappraisal of the Weir equation for calculation of metabolic rate. *Am J Physiol.* 1990;258(6 Pt 2):R1347-R1354. doi: 10.1152/ajpregu.1990.258.6.R1347

REFERENCES

1. Kanonin YuN, Tihomirov OI. Prospects for the use of industrial exoskeletons in railway transport as personal protective equipment. *Izvestiya Peterburgskogo Universiteta Putey Soobshcheniya.* 2024;21(2):370-379. (In Russ.) doi: 10.20295/1815-588X-2024-02-370-379
2. Schmalz T, Schändlinger J, Schuler M, et al. Biomechanical and metabolic effectiveness of an industrial exoskeleton for overhead work. *Int J Environ Res Public Health.* 2019;16(23):4792. doi: 10.3390/ijerph16234792
3. Blanco A, Catalán JM, Martínez-Pascual D, García-Pérez JV, 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;10:16479-16488. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3150104
4. Qu X, Qu C, Ma T, 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. doi: 10.1371/journal.pone.0245629
5. Geregei AM, Shitova ES, Malakhova IS, et al. Up-to-date techniques for examining safety and physiological efficiency of industrial exoskeletons. *Health Risk Analysis.* 2020;(3):147-158. doi: 10.21668/health.risk/2020.3.18.eng
6. Mal'chikov AV, Yatsun AS, Belov AYu, Repkin AV. [Analysis of the effectiveness of using an exoskeleton in the production process of an industrial enterprise.] In: *Youth and Knowledge – The Guarantee of Success – 2019: Proceedings of the Sixth International Youth Scientific Conference, Kursk, September 18–19, 2019.* Kursk: South-West State University; 2019;3:234-237. (In Russ.)
7. Orlov IA, Aliseychik AP, Merkulova AG, et al. The relevance of the use of industrial exoskeletons to reduce the number of occupational diseases of the musculoskeletal system of the upper body. *Meditsina Truda i Promyshlennaya Ekologiya.* 2019;59(7):412-416. (In Russ.) doi: 10.31089/1026-9428-2019-59-7-412-416
8. Yatsun AS, Shcherbakova MP, Malchikov AV. The use of EMG to assess the effectiveness and safety of an industrial exoskeleton in the workplace. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo Gosudarstvennogo Universiteta.*

9. Geregey AM, Glukhov DV, Efimov AR. Industrial exoskeletons. Normative and methodological regulation. *Meditsina Truda i Promyshlennaya Ekologiya.* 2019;59(9):598-599. (In Russ.) doi: 10.31089/1026-9428-2019-59-9-598-599
10. Hoffmann N, Prokop G, Weidner R. Methodologies for evaluating exoskeletons with industrial applications. *Ergonomics.* 2021;65(2):276-295. doi: 10.1080/00140139.2021.1970823
11. Theurel J, Desbrosses K. Occupational exoskeletons: Overview of their benefits and limitations in preventing work-related musculoskeletal disorders. *IJSE Trans Occup Ergon Hum Factors.* 2019;7(3-4):264-280. doi: 10.1080/24725838.2019.1638331
12. Lowe BD, Billotte WG, Peterson DR. ASTM F48 formation and standards for industrial exoskeletons and exosuits. *IJSE Trans Occup Ergon Hum Factors.* 2019;7(3-4):230-236. doi: 10.1080/24725838.2019.1579769
13. Hefferle M, Lechner M, Kluth K, Christian M. Development of a standardized ergonomic assessment methodology for exoskeletons using both subjective and objective measurement techniques. In: Chen J, ed. *Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems. AHFE 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing.* Springer, Cham; 2020;962. doi: 10.1007/978-3-030-20467-9_5
14. Reimeir B, Calisti M, Mittermeier R, Ralfs L, Weidner R. Effects of back-support exoskeletons with different functional mechanisms on trunk muscle activity and kinematics. *Wearable Technol.* 2023;4:e12. doi: 10.1017/wtc.2023.5
15. Falcone T, Del Ferraro S, Molinaro V, Zollo L, Lenzuni P. Estimation of the metabolic rate in the occupational field: A regression model using accelerometers. *Int J Ind Ergon.* 2023;96:103454. doi: 10.1016/j.ergon.2023.103454
16. Maurice P, Čamernik J, Gorjan D, et al. Objective and subjective effects of a passive exoskeleton on overhead work. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2020;28(1):152-164. doi: 10.1109/TNSRE.2019.2945368
17. Gamza NA, Grin' GR, Zhukova TV. [Functional Tests in Sports Medicine.] Minsk: Belorussian State University of Physical Education; 2012. (In Russ.)
18. Weir JB. New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J Physiol.* 1949;109(1-2):1-9. doi: 10.1113/jphysiol.1949.sp004363
19. Mansell PI, Macdonald IA. Reappraisal of the Weir equation for calculation of metabolic rate. *Am J Physiol.* 1990;258(6 Pt 2):R1347-R1354. doi: 10.1152/ajpregu.1990.258.6.R1347

Сведения об авторах:

✉ Шупорин Евгений Сергеевич – научный сотрудник, и.о. заведующего лабораторией средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов; e-mail: ppe-lab@irioh.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7590-431X>.

Чудова Елена Станиславовна – младший научный сотрудник лаборатории средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов; e-mail: ppe-lab@irioh.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2746-2915>.

Ильенко Олег Владимирович, – младший научный сотрудник лаборатории средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов; e-mail: ppe-lab@irioh.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9760-8685>.

Вага Иван Николаевич, – инженер лаборатории средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов; e-mail: ppe-lab@irioh.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2765-145X>.

Моткова Татьяна Юрьевна, – техник лаборатории средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов; e-mail: ppe-lab@irioh.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6287-918X>.

Информация о вкладе авторов: концепция и дизайн исследования: Шупорин Е.С., Ильенко О.В.; сбор и обработка данных, статистическая обработка данных: Вага И.Н., Моткова Т.Ю.; литературный обзор: Вага И.Н.; подготовка рукописи: Шупорин Е.С., Чудова Е.С., Ильенко О.В., Моткова Т.Ю. Все авторы ознакомлены с результатами работы и одобрили окончательный вариант рукописи.

Соблюдение этических стандартов: исследование проведено с соблюдением протокола «Исследование безопасности и эффективности применения промышленного экзоскелета», одобренного Локальным этическим комитетом ФГБНУ «НИИ МТ» (протокол № 1 заседания Локального этического комитета от 25.01.2023). От всех участников исследования было получено добровольное информированное согласие.

Финансирование: исследование проведено без спонсорской поддержки.

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

Статья получена: 15.04.25 / Принята к публикации: 10.06.25 / Опубликовано: 30.06.25

Author information:

✉ Evgenii S. **Shuporin**, Researcher, Acting Head of the Laboratory for Personal Protective Equipment and Industrial Exoskeletons; e-mail: ppe-lab@iriogh.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7590-431X>.

Elena S. **Chudova**, Junior Researcher, Laboratory for Personal Protective Equipment and Industrial Exoskeletons; e-mail: ppe-lab@iriogh.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2746-2915>.

Oleg V. **Ilyenko**, Junior Researcher, Laboratory for Personal Protective Equipment and Industrial Exoskeletons; e-mail: ppe-lab@iriogh.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9760-8685>.

Ivan N. **Vaga**, Engineer, Laboratory for Personal Protective Equipment and Industrial Exoskeletons; e-mail: ppe-lab@iriogh.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2765-145X>.

Tatyana Yu. **Motkova**, Technician, Laboratory for Personal Protective Equipment and Industrial Exoskeletons; e-mail: ppe lab@iriogh.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6287-918X>.

Author contributions: study conception and design: *Shuporin E.S., Ilyenko O.V.*; data collection, analysis and interpretation of results: *Vaga I.N., Motkova T.Yu.*; bibliography compilation and referencing: *Vaga I.N.*; draft manuscript preparation: *Shuporin E.S., Chudova E.S., Ilyenko O.V., Motkova T.Yu.* All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

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 approved by the Local Ethics Committee of the Izmerov Research Institute of Occupational Health (protocol No. 1 of January 25, 2023). Voluntary informed consent was obtained from all study participants.

Funding: The authors received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article.

Conflict of interest: The authors have no conflicts of interest to declare.

Received: April 15, 2025 / Accepted: June 10, 2025 / Published: June 30, 2025