

EDN: <https://elibrary.ru/ktskmm>DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2025-65-1-18-27>

УДК 613.65: 613.6.027

© Коллектив авторов, 2025

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

Физиолого-гигиеническая оценка безопасности применения промышленного экзоскелета в условиях моделирования трудовой деятельности

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», пр-т Будённого, 31, Москва, 105275

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 подъеме, опускании, переносе и удерживании грузов массой до 50 кг.

Цель исследования — оценка безопасности применения промышленного экзоскелета при моделировании трудовой деятельности.

Материалы и методы. Оценка функционального состояния человека проводилась в рамках разработанной лабораторной модели трудовой деятельности потенциального потребителя промышленного экзоскелета с использованием медико-биологических методов: врачебный осмотр, регистрация биомеханики движений и анкетирование. Полученные данные подвергали статистическому анализу.

Результаты. Использование промышленного экзоскелета не сказывается на общем функциональном состоянии добровольца и не ограничивает движения в области нижних конечностей, но может частично ограничивать движения в плечевых суставах и затруднять выполнение движений в груднопоясничном отделе позвоночника. Доброволец может испытывать локальный дискомфорт в местах соприкосновения деталей экзоскелета с кожей: в передней поверхности лучезапястного сустава, ладонных поверхностях кисти, передней поверхности бедра, области поясничного отдела позвоночника.

Ограничения исследования. В исследовании участвовали только 12 респондентов, что может ограничивать возможность распространения данных на генеральную совокупность, но в ходе статистической обработки между результатами не было выявлено противоречивых значений у разных участников. Исследование безопасности использования промышленного экзоскелета проводилось в лабораторных условиях, которые не полностью воспроизводили реальные и упускали часть факторов, которые воздействуют на работника на производстве, но условия, связанные напрямую с применением промышленного экзоскелета, были воспроизведены.

Выводы. Исследование позволяет сделать вывод о безопасности использования промышленного экзоскелета в том случае, если производственные операции, выполняемые в нем, аналогичны разработанной лабораторной модели. Не было показано негативного влияния на общее состояние добровольцев и амплитуду движений нижних конечностей. Были отмечены ограничения движений верхних конечностей и в груднопоясничном отделе позвоночника, связанные с конструктивными характеристиками промышленного экзоскелета. Требуется изменение особенностей промышленного экзоскелета, которые могут приводить к формированию микротравм.

Этика. 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 г.).

Ключевые слова: промышленный экзоскелет; безопасность труда; средства индивидуальной защиты

Для цитирования: Шупорин Е.С., Чудова Е.С., Ильенко О.В., Вага И.Н., Моткова Т.Ю. Физиолого-гигиеническая оценка безопасности применения промышленного экзоскелета в условиях моделирования трудовой деятельности. *Мед. труда и пром. экол.* 2025; 65(1): 18–27. <https://elibrary.ru/ktskmm> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2025-65-1-18-27>

Для корреспонденции: Чудова Елена Станиславовна, 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. — сбор и обработка данных;

Моткова Т.Ю. — сбор и обработка данных.

Финансирование. Финансирование осуществлялось в рамках выполнения Государственного задания по фундаментальным научным исследованиям. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 14.11.2024 / Дата принятия к печати: 19.12.2024 / Дата публикации: 07.02.2025

Введение. Чрезмерные физические нагрузки, возникающие в ходе выполнения производственных операций, являются причиной развития заболеваний опорно-двигательного аппарата (ОДА). Длительное пребывание в одной позе, наклоны корпуса, большое количество повторяющихся движений, работа с тяжестями могут негативно сказываться на состоянии здоровья работников [1].

В структуре профессиональной патологии в зависимости от воздействия производственного фактора заболеваемости, связанная с воздействием физического перенапряжения и перегрузок отдельных систем и органов, занимала второе ранговое место и составляла 26,47% в 2023 г. [2].

Одним из возможных вариантов решения проблемы является применение промышленных экзоскелетов [3–8].

Сотрудниками ФГБНУ «НИИ МТ» было проведено исследование безопасности применения промышленного экзоскелета, разработанного для уменьшения нагрузки на мышцы спины и верхних конечностей, а также для перемещения груза массой до 50 кг компанией ПАО «Интелтех» в 2022 г. Объектом исследования являлась динамика функционального состояния организма человека при выполнении физической работы с применением промышленного экзоскелета. В качестве объекта исследования рассматривалась динамика функционального состояния

организма человека, выполняющего физическую работу с использованием промышленного экзоскелета. Были применены следующие методики исследования: оценка частоты сердечных сокращений (ЧСС) и показателей артериального давления (АД) [9], анкетирование, [10–11], регистрация максимальных амплитуд активных движений (МАОД) [12–20].

Цель исследования — оценка безопасности применения промышленного экзоскелета, разработанного для снижения нагрузки на мышцы верхних конечностей и спины в условиях моделирования трудовой деятельности.

Материалы и методы. Для проведения исследования безопасности применения промышленных экзоскелетов (ПЭ) был использован ПЭ ProEco комплектация Boost (*рисунки*), предназначенный, по заявлению производителя, для разгрузки мышц спины и верхних конечностей при подъеме, опускании, переносе и удерживании грузов массой до 50 кг.

В результате медицинского осмотра были отобраны 12 практически здоровых мужчин от 18 до 45 лет, у которых было выявлено отсутствие 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. Участники подписывали добровольное информированное согласие на включение в исследование.

Проведено рандомизированное распределение участников исследования на две группы методом случайной выборки. Первая группа использовала ПЭ (экспериментальная), вторая выполняла ту же трудовую деятельность без него (контрольная).

Чтобы класс тяжести разрабатываемой лабораторной модели трудовой деятельности был не ниже 3.1 (вредные условия труда)¹, были рассчитаны необходимая суммарная масса грузов и количество выполняемых наклонов.

Моделирование рабочего места осуществлялось следующим образом: 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 закреплён горизонтальный модуль, представляющий собой рабочую поверхность. В ходе следования рабочему циклу доброволец выполнял следующие действия:

- 1) подъём груза, массой 25 кг, с пола и перемещение его на расстояние 5 м;
- 2) наклон корпуса работника вперёд 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.

Эксперимент длился 6 часов, через каждые 90 минут работы шло 10 минут отдыха.

Для оценки общего функционального состояния добровольца фиксировали ЧСС и АД.

Для оценки сохранности движений и поддержания рабочих поз проводили регистрацию МАОД.

Для оценки показателей МАОД применяли систему для комплексной объективной оценки двигательных функций, регистрации биомеханики движений и электромиографии «Биомеханика Траст-М» (ООО «Неврокор»,

¹ Р 2.2.2006-05 «Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда»



Рисунок. Промышленный экзоскелет

г. Москва). Тестирование проводили вне моделирования трудовой деятельности без использования ПЭ (I группа добровольцев) и с его применением (II группа добровольцев). На поверхности тела добровольца были зафиксированы инерциальные датчики, а затем участник исследования десятикратно выполнял стандартизированные упражнения на максимальное по амплитуде сгибание и разгибание конечностей и корпуса.

В процессе исследования каждые 15 минут фиксировали субъективную оценку добровольцами текущего локального дискомфорта с помощью 5-балльной шкалы Лайкерта: чрезвычайно неудобно (1), очень неудобно (2), довольно неудобно (3), слегка неудобно (4), удобно (5).

Статистическая обработка результатов осуществлялась с помощью пакета прикладных программ MS Office Excel 2019 и Statistica 10.0. для проверки данных на нормальность распределения были использованы критерии Шапиро–Уилка и Колмогорова–Смирнова. Затем было проведено сравнение показателей, полученных до и после моделирования трудовой деятельности, а также результатов, полученных с использованием ПЭ и без него непараметрическими методами (*W*-критерий Вилкоксона). Критический уровень значимости $p \leq 0,05$.

Результаты. В исследовании приняло участие 12 мужчин от 18 до 45 лет. Один из добровольцев отказался от участия во втором этапе эксперимента.

Показатели общего состояния добровольцев представлены в *таблице 1*.

Сравнительный анализ показателей общего состояния добровольцев выявил статистически значимое увеличение ЧСС в контрольном тестировании по сравнению с фоновым на 12% в группе I (без использования экзоскелета) и на 13% в группе II (с использованием ПЭ). Не было выявлено статистически значимых различий между группами.

Данные, полученные в результате оценки влияния применения экзоскелета на МАОД верхних конечностей показаны в *таблице 2*.

Показано статистически значимое различие значений показателей МАОД у добровольцев, находящихся в промышленном экзоскелете и без него, использование ПЭ привело к уменьшению МАОД при сгибании в ППС на 40,9% ($p=0,002$), сгибании в ЛПС на 26,7% ($p=0,009$), разгибании в ППС на 44,4% ($p=0,002$), разгибании в ЛПС на 38% ($p=0,002$).

Результаты оценки влияния ПЭ на показатели МАОД в тазобедренных суставах (ТС) нижних конечностей представлены в *таблице 3*.

Таблица 1

Показатели общего состояния добровольцев, $M \pm \sigma$, $n=11$

Показатель, ед. изм.	Тестирование			
	Фоновые значения		Контрольные значения	
	I группа		II группа	
САД, мм рт. ст.	129,7±10,6	125,5±10,3	129,3±10,4	131,8±10,7
ДАД, мм рт. ст.	72,8±9,0	71,4±8,8	74,3±9,9	77,9±7,8
ЧСС, уд./мин.	77,0±9,9	86,2±13,3*	77,1±12,8	87±15,1*

Примечания: n — количество добровольцев в каждой группе; M — среднее значение показателя; σ — среднее квадратичное отклонение; САД — систолическое артериальное давление; ДАД — диастолическое артериальное давление; * — статистически значимые различия по сравнению с фоновыми значениями ($p \leq 0,05$).

Таблица 2

Показатели максимальных амплитуд активных движений в крупных суставах верхних конечностей, градусы, Me (IQR), $n=12$

Показатель	Вид движения							
	Сгибание ПС		Разгибание ПС		Отведение ПС		Сгибание ЛС	
	ППС	ЛПС	ППС	ЛПС	ППС	ЛПС	ПАС	ЛАС
I группа добровольцев								
МААД	154 (141–175)	161 (130–169)	45 (42–60)	40 (35–44)	139,5 (121–154)	134 (119–146)	118 (112–134)	126 (120–132)
II группа добровольцев								
МААД	91 (82–102)*	118 (95–141)*	25 (19–34)*	24,8 (13–31)*	138 (112–152)	107 (84–143)	115 (97–127)	119 (103–132)

Примечания: n — количество добровольцев в каждой группе; Me — медиана показателя; IQR — интерквартильный размах, нижний квартиль 25% — верхний квартиль 75%; ЛПС — левый плечевой сустав; ППС — правый плечевой сустав; ЛАС — левый локтевой сустав; ПАС — правый локтевой сустав; * — статистически значимые различия по сравнению с I группой ($p \leq 0,05$).

Таблица 3

Показатели максимальных амплитуд активных движений в тазобедренном суставе, градусы, Me (IQR), $n=12$

Показатель	Вид движения									
	Сгибание		Разгибание		Отведение		Сгибание при приседании		Сгибание при подъёме	
	ПТС	ЛТС	ПТС	ЛТС	ПТС	ЛТС	ПТС	ЛТС	ПТС	ЛТС
I группа добровольцев										
МААД	72 (64–79)	77 (67–86)	20 (17–24)	18 (15–24)	38 (31–46)	41 (26–45)	107 (95–112)	112 (105–115)	101 (88–110)	105 (101–108)
II группа добровольцев										
МААД	64 (60–77)	67 (60–85)	17 (14–21)	16 (13–21)	32 (30–40)	31 (25–40)	102 (93–104)	102 (96–109)	84 (78–90)*	86 (83–90)*

Примечания: n — количество добровольцев в каждой группе; Me — медиана показателя; IQR — интерквартильный размах, нижний квартиль 25% — верхний квартиль 75%; ПТС — правый тазобедренный сустав; ЛТС — левый тазобедренный сустав; * — статистически значимые различия по сравнению с I группой ($p \leq 0,05$).

В группе с применением промышленного экзоскелета показатели МААД были значимо ниже, чем в контрольной группе, а именно при сгибании в левом тазобедренном суставе при подъёме согнутой в коленном суставе ноги на 18% ($p=0,002$), при сгибании в ПТС при подъёме ноги, согнутой в коленном суставе, на 16,4% ($p=0,007$).

Не было показано статистически значимых различий при анализе результатов оценки ММАД в коленном суставе.

В **таблицах 4–5** представлены результаты оценки ограничений МААД в груднопоясничном отделе позвоночника.

В результате были показаны значимо большие ограничения МААД при использовании промышленного

экзоскелета при сгибании грудного отдела кпереди при выполнении приседаний на 23,8% ($p=0,022$), сгибания вправо в грудном отделе на 20,7% ($p=0,010$), сгибания влево в грудном отделе на 23,6% ($p=0,049$), ротации вправо в грудном отделе на 28,3% ($p=0,002$), ротации влево в грудном отделе на 16% ($p=0,020$).

Продемонстрировано статистически значимое различие между группами с меньшими значениями МААД у добровольцев II группы при сгибании в поясничном отделе при наклоне туловища вперёд на 38,5% ($p=0,003$), сгибании поясничного отдела в сагиттальной плоскости при выполнении приседаний на 64,9% ($p=0,002$), флексии во фронтальной плоскости вправо в поясничном отделе на

Таблица 4

Показатели максимальных амплитуд активных движений в грудном отделе позвоночника, град., Me (IQR), n=12

Показатель	Вид движения						
	Сгибание	Разгибание	Приседание	Флексия		Ротация	
				вправо	влево	вправо	влево
I группа добровольцев							
МААД	21 (13–25)	13 (11–21)	16 (14–25)	26 (22–32)	27 (23–31)	39 (37–47)	36 (31–47)
II группа добровольцев							
МААД	26 (19–25)	10 (6–15)	13 (10–16)*	21 (18–23)*	21 (14–25)*	28 (21–37)*	30 (25–34)*

Примечания: *n* — количество добровольцев в каждой группе; *Me* — медиана показателя; *IQR* — интерквартильный размах, нижний квартиль 25%, верхний квартиль 75%; * — статистически значимые различия по сравнению с I группой ($p \leq 0,05$).

Таблица 5

Показатели МААД в поясничном отделе позвоночника, град., Me (IQR), n=12

Показатель	Вид движения						
	Сгибание	Разгибание	Приседание	Флексия		Ротация	
				вправо	влево	вправо	влево
I группа добровольцев							
МААД	54 (50–73)	19 (18–22)	47 (31–57)	20 (17–25)	21 (17–31)	13 (6–18)	16 (11–22)
II группа добровольцев							
МААД	33 (21–40)*	14 (11–17)	17 (7–31)*	13 (10–16)*	10 (9–15)*	4 (2–5)*	6 (5–9)*

Примечания: *n* — количество добровольцев в каждой группе; *Me* — медиана показателя; *IQR* — интерквартильный размах, нижний квартиль 25%, верхний квартиль 75%; * — статистически значимые различия по сравнению с I группой ($p \leq 0,05$).

35% ($p=0,004$), флексии во фронтальной плоскости влево в поясничном отделе на 50,7% ($p=0,001$), ротации вправо в поясничном отделе на 70% ($p=0,003$), ротации влево в поясничном отделе на 63,5% ($p=0,007$).

Субъективные данные указывают на наличие дискомфорта в передней поверхности лучезапястного сустава, ладонных поверхностях кисти, передней поверхности бедра, области поясничного отдела позвоночника. Во второй половине моделирования трудовой деятельности интенсивность дискомфорта усилывалась, что выражалось в снижении средних баллов, оценивающих силу дискомфорта. Дискомфорт в передней области запястья и ладонных области кисти связан с использованием перчаток, входящих в комплект ПЭ, ввиду давления на область между большим и указательным пальцем и манжету СИЗ, имеющую металлическую фурнитуру в форме заклёпок. Добровольцами отмечалась недостаточная фиксация бедренной манжеты. Дискомфорт в поясничной области позвоночника связан с давлением пластиковой пластины ПЭ на соответствующую область, в результате смещения подушки ПЭ и смещения СИЗ вверх в процессе работы. У добровольцев по окончании работ (180 мин.) отмечались намыны и покраснение кожных покровов на соответствующих участках тела.

Обсуждение. При осмотре врача показатели сердечно-сосудистой системы добровольцев находились в пределах референтных значений. Отсутствие статистически значимых различий в условиях с применением промышленного экзоскелета и без него говорит о том, что использование промышленного экзоскелета не оказывает влияния на общее функциональное состояние добровольца.

Изменения МААД свидетельствуют о том, что применение промышленного экзоскелета не влияет существенно на выполнение большинства простых движений в крупных суставах нижних конечностей, но может ограничивать

движения в плечевых суставах и в грудопоясничном отделе позвоночника. Эти ограничения необходимо учитывать при использовании ПЭ в производственных операциях, требующих выполнения движений, отличных от описанных в статье.

Результаты анализа субъективной оценки локального дискомфорта указывают на то, что дискомфорт связан с непосредственным контактом элементов ПЭ и стандартных комплектов СИЗ с кожей. Таким образом, длительное применение ПЭ при имеющихся условиях может приводить к микротравмам кожи.

Выводы:

1. Применение промышленного экзоскелета является безопасным при выполнении производственных операций, аналогичных лабораторной модели трудовой деятельности, несмотря на выявленные недостатки.

2. Применение промышленного экзоскелета при выполнении трудовой деятельности, связанной с подъёмом, перемещением и удержанием груза, не оказывает негативного влияния на общее состояние человека, в частности на кардиореспираторную систему, а также на качество выполнения большинства простых движений в крупных суставах нижних конечностей.

3. Вместе с тем конструктивные характеристики промышленного экзоскелета могут вызывать ограничение экскурсии грудной клетки и движений сгибания и разгибания в плечевых суставах, а также затруднять большинство движений в грудопоясничном отделе позвоночника, что следует учитывать при необходимости выполнения производственных операций, включающих в себя подъём рук вверх, отведение рук назад, наклоны корпуса в стороны, скручивания и глубокие приседания.

4. Требуется изменение конструктивных особенностей промышленного экзоскелета, создающих возможность возникновения микротравм кожи при длительном применении

промышленного экзоскелета ввиду давления перчаток на область кисти во время выполнения работы и недостаточной

фиксации подушки промышленного экзоскелета к пластиковой пластине в области спины.

Список литературы

- 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): 370–379. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2024-02-370-379>
- 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.
- Geregei A.M., Shitova E.S., Malakhova I.S., Shuporin E.S., Bondaruk E.V., Efimov A.R., Takh V.Kh. Up-to-date techniques for examining safety and physiological efficiency of industrial exoskeletons. *Health Risk Analysis*. 2020; 3: 148–159. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.18>
- 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): 671–681. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988>
- Zheng L., Lowe B., Hawke A., Wu J. Evaluation and Test Methods of Industrial Exoskeletons In Vitro, In Vivo, and In Silico: A Critical Review. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*. 2021; 49(4): 1–13 <https://doi.org/10.1615/CritRevBiomedEng.2022041509>
- Li-Baboud Y.-S., Virts A., Bostelman R., Yoon S., Rahman A., Rhode L. et al. Evaluation Methods and Measurement Challenges for Industrial Exoskeletons. *Sensors*. 2023; 23(12): 5604. <https://doi.org/10.3390/s23125604>
- Hoffmann N., Prokop G., Weidner, R. Methodologies for evaluating exoskeletons with industrial applications. *Ergonomics*. 2021; 65(2): 276–295. <https://doi.org/10.1080/00140139.2021.1970823>
- Kuber P.M., Rashedi E. Product ergonomics in industrial exoskeletons: potential enhancements for workforce efficiency and safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2020; 22(6): 729–752. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2020.1850905>
- Cho K., Kim Y., Yi D., Jung M., Lee K. Analysis and evaluation of a combined human — exoskeleton model under two different constraints condition. In: *Conference: International Summit on Human Simulation 2012*, At St. Pete Beach, FL; 2012.
- Masood J., Nieto A., Victor A., Blanco M., Voilque A., Bou J. Industrial wearable exoskeleton and exosuit assessment process. *4th International Symposium on Wearable Robotics "WeRob2018"*. 2018: 234–238.
- Гамза Н.А., Гринь Г.Р., Жукова Т.В. Функциональные пробы в спортивной медицине. Минск: Белорусский государственный университет физической культуры; 2012.
- Cardoso A., Colim A., Sousa N. The Effects of a Passive Exoskeleton on Muscle Activity and Discomfort in Industrial Tasks. In: Arezes P. et al. *Occupational and Environmental Safety and Health II. Studies in Systems, Decision and Control*. 2020; 277: https://doi.org/10.1007/978-3-030-41486-3_26
- Bosch T., Eck J., Knitel K., Looze M. The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics*. 2016; 6: 212–217.
- Скворцова В.И., Иванова Г.Е., Скворцов Д.В. Исследование биомеханики движений комплекса онтогенетически ориентированной кинезотерапии. *Лечебная физкультура и спортивная медицина*. 2010; 5(77): 13–18.
- Кауркин С.Н., Скворцов Д.В., Иванова Г.Е. Содружественные движения плечевых суставов и туловища у здоровых испытуемых. *Физиология человека*. 2020; 46(2): 30–37. <https://doi.org/10.31857/S013116462002006X>
- Huysamen K., de Looze M., Bosch T., Ortiz J., Toxiri S., O'Sullivan L.W. Assessment of an active industrial exoskeleton to aid dynamic lifting and lowering manual handling tasks. *Applied Ergonomics*. 2018; 68: 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.11.004>
- Grazi L., Trigili E., Caloi N., Ramella G., Giovacchini F., Vitiello N. et al. Kinematics-Based Adaptive Assistance of a Semi-Passive Upper-Limb Exoskeleton for Workers in Static and Dynamic Tasks. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022; 7(4): 8675–8682. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3188402>
- Zhou X., Zheng L. Model-Based Comparison of Passive and Active Assistance Designs in an Occupational Upper Limb Exoskeleton for Overhead Lifting. *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*. 2021; 9(3–4): 167–185. <https://doi.org/10.1080/24725838.2021.1954565>
- Jones R., Arbor A. Pneumatically Powered Lower Limb Exoskeletons. *Department of Mechanical Engineering the University of Michigan*. <https://vk.cc/c13CJV>
- Goniometric assessment of shoulder range of motion: comparison of testing in supine and sitting positions. <https://clck.ru/3Fjfbv>

Сведения об авторах:

- Шупорин Евгений Сергеевич и.о. заведующего лабораторией средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов.
E-mail: ppe-lab@irioh.ru
<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
<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
<https://orcid.org/0009-0000-9760-8685>
- Вага Иван Николаевич инженер лаборатории средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов.
E-mail: ppe-lab@irioh.ru
<https://orcid.org/0009-0004-2765-145X>
- Моткова Татьяна Юрьевна техник лаборатории средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов.
E-mail: ppe-lab@irioh.ru
<https://orcid.org/0009-0006-6287-918X>