



Научная статья

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭКСОСКЕЛЕТОВ

А.М. Герегей<sup>1</sup>, Е.С. Шитова<sup>1</sup>, И.С. Малахова<sup>1</sup>, Е.С. Шупорин<sup>1</sup>,  
Е.В. Бондарук<sup>1</sup>, А.Р. Ефимов<sup>2,3</sup>, В.Х. Тах<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова, Россия, 105275, г. Москва, проспект Буденного, 31

<sup>2</sup>Публичное акционерное общество «Сбербанк России», Россия, 117997, г. Москва, ул. Вавилова, 19

<sup>3</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Россия, 119049, г. Москва, Ленинский проспект, 4

*Профессиональная заболеваемость, связанная с воздействием физических перегрузок и перенапряжением отдельных органов и систем, занимает второе ранговое место в структуре профессиональной патологии в зависимости от воздействующего вредного производственного фактора. В связи с этим актуальным и перспективным направлением является развитие технологий промышленных экзоскелетов, способных защитить опорно-двигательный аппарат работника от чрезмерных физических нагрузок. При этом одной из проблем, создающей существенные ограничения внедрения промышленных экзоскелетов на производствах как в России, так и в других странах, является отсутствие соответствующей нормативно-технической базы.*

*Значимую роль в формировании нормативно-технической базы играет возможность объективного медико-биологического исследования безопасности и физиологической эффективности применения промышленных экзоскелетов. Разработанные и опробованные методы исследования физиолого-эргономических характеристик промышленных экзоскелетов внесут существенный вклад в систему их комплексных эргономических испытаний на этапах разработки, создания и опытной эксплуатации.*

*Рассматриваются современные медико-биологические методы исследования безопасности и физиологической эффективности применения промышленных экзоскелетов. Приведены примеры использования метода «захвата движений» с использованием инерциальных датчиков, эргоспирометрии, электромиографии и мионометрии для оценки физиолого-эргономических характеристик промышленных экзоскелетов в условиях моделирования трудовой деятельности.*

*Результаты настоящего исследования с использованием вышеперечисленных методов подтвердили безопасность и эффективность применения промышленных экзоскелетов для работников физического труда при выполнении ими производственных операций, аналогичных разработанным моделям. Используемые методы могут существенно расширить имеющиеся подходы к исследованию функционального состояния работников физического труда, а полученные результаты внесут значимый вклад в разработку нормативно-технической базы перспективного типа средств индивидуальной защиты опорно-двигательного аппарата в рамках системы стандартов безопасности труда.*

**Ключевые слова:** промышленные экзоскелеты, средства индивидуальной защиты, биомеханический анализ движений, эргоспирометрия, электромиография, мионометрия.

© Герегей А.М., Шитова Е.С., Малахова И.С., Шупорин Е.С., Бондарук Е.В., Ефимов А.Р., Тах В.Х., 2020

**Герегей Андрей Михайлович** – заведующий лабораторией средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов (e-mail: pre-lab@iirioh.ru; тел.: 8 (925) 083-25-55; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7927-2505>).

**Шитова Евгения Сергеевна** – младший научный сотрудник лаборатории средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов (e-mail: shitova.zhe@gmail.com; тел.: 8 (996) 441-85-09; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4379-5187>).

**Малахова Инга Сергеевна** – младший научный сотрудник лаборатории средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов (e-mail: malahova.is@mail.ru; тел.: 8 (981) 784-07-29; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3215-3517>).

**Шупорин Евгений Сергеевич** – младший научный сотрудник лаборатории средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов (e-mail: doctorshuporin@gmail.com; тел.: 8 (910) 481-34-38; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7590-431X>).

**Бондарук Евгения Владимировна** – младший научный сотрудник лаборатории средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов (e-mail: evegena@gmail.com; тел.: 8 (926) 826-56-63; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3762-0636>).

**Ефимов Альберт Рувимович** – вице-президент-директор управления исследований и инноваций, старший преподаватель кафедры инженерной кибернетики (e-mail: arefimov@sberbank.ru; тел.: 8 (916) 188-18-11; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6857-8659>).

**Тах Владимир Христьянович** – руководитель направления Центра робототехники (e-mail: sugggar@yandex.ru; тел.: 8 (929) 237-37-76; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9611-2992>).

Профессиональная заболеваемость, связанная с воздействием физических перегрузок и перенапряжением отдельных органов и систем, в 2018 г. по-прежнему занимает второе ранговое место в структуре профессиональной патологии в зависимости от воздействующего вредного производственного фактора и составляет 24,7 %<sup>1</sup>. При этом на сегодняшний день отсутствуют средства индивидуальной защиты (СИЗ), способные предотвратить неблагоприятное воздействие тяжести трудового процесса на опорно-двигательный аппарат (ОДА) работника. В связи с этим перспективным направлением является внедрение промышленных экзоскелетов (ПЭ), способных защитить опорно-двигательный аппарат работника от перенапряжений, связанных с физическими нагрузками. Мировой рынок ПЭ растет, множество предприятий как за рубежом [1, 3–5], так и в нашей стране [7–9] уже предпринимают попытки их применения.

Одной из основных проблем, создающих существенные ограничения внедрения ПЭ на производствах, как в России, так и в других странах, является отсутствие нормативно-технической базы, регламентирующей требования к ним [1].

В настоящее время в соответствии с Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 962 от 21.05.2020 г. «Об организации деятельности технического комитета по стандартизации “Средства индивидуальной защиты”» в структуре ТК 320 (Средства индивидуальной защиты) сформирован ПК 11 (Промышленные экзоскелеты), организованный на базе ФГБНУ НИИ МТ. В рамках «Программы национальной стандартизации на 2020 год» ФГБНУ НИИ МТ совместно с разработчиками ПЭ, крупными предприятиями и научно-исследовательскими организациями осуществляет работы по подготовке двух проектов национальных стандартов, регламентирующих требования к ПЭ как к новому типу СИЗ ОДА<sup>2</sup>.

Не вызывает сомнения, что существенную роль в формировании заключений, касающихся безопасности и физиологической эффективности ПЭ, играет их объективная медико-биологическая оценка. Нами были проанализированы современные подходы к исследованию функционального состояния человека, применяемые в медицине труда, спортивной медицине, функциональной диагностике, реабилитации и других областях. Методами выбора для настоящего исследования явились:

– «захват движений» с использованием инерциальных датчиков как наиболее приемлемый метод оценки биомеханики движений в суставах<sup>3</sup>;

– эргоспирометрия (ЭСМ) как неинвазивный метод комплексной оценки состояния кардиореспираторной системы [1–11];

– электромиография (ЭМГ) как основной метод оценки биоэлектрической активности мышц [11–16];

– миотонометрия (МТМ) как современный метод оценки мышечного тонуса.

Кроме того, в исследование были включены традиционные, широко используемые в клинической и профилактической медицине динамометрия<sup>4</sup>, стабиллометрия, психофизиологическое тестирование, анкетирование, интервьюирование, а также проведение функциональных проб [17, 18].

Для исследования безопасности и физиологической эффективности применения ПЭ специалисты ФГБНУ НИИ МТ совместно с Лабораторией робототехники ПАО «Сбербанк», ООО «Полезные роботы» и ООО «Экзоатлант» выполнили научно-исследовательскую работу, наиболее значимые результаты которой изложены ниже.

**Цель исследования** – оценка безопасности и физиологической эффективности применения промышленных экзоскелетов в условиях моделирования трудовой деятельности с использованием современных методов исследования.

**Материалы и методы.** Разработку моделей трудовой деятельности осуществляли в условиях лаборатории ФГБНУ НИИ МТ, основываясь на показателях тяжести трудового процесса и характеристиках рабочих поз и движений специалистов двух профессий:

– логиста архивно-логистического центра ПАО «Сбербанк»;

– кассира отдела по работе с драгоценными металлами главного кассового центра ПАО «Сбербанк».

Для моделирования трудовой деятельности были созданы условия, идентичные таковым на рабочих местах логиста архивно-логистического центра и кассира отдела по работе с драгоценными металлами главного кассового центра ПАО «Сбербанк».

На рис. 1 изображены модели рабочих мест логиста архивно-логистического центра и кассира отдела по работе с драгоценными металлами главного кассового центра ПАО «Сбербанк».

<sup>1</sup> О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2018 году: Государственный доклад. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2019. – 254 с.

<sup>2</sup> Об утверждении Программы национальной стандартизации на 2020 год: Приказ Росстандарта от 01.11.2019 № 2612 (ред. от 18.03.2020) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_338715/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_338715/) (дата обращения: 08.06.2020).

<sup>3</sup> Способ оценки эргономических свойств элементов боевой индивидуальной экипировки военнослужащих: патент RU2671187C1, А61В 5/103. № 2017144762; заявл. 19.12.2017; опубл. 29.10.2018. Бюл. № 31. – 24 с.

<sup>4</sup> ГОСТ 12.4.061-88. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Метод определения работоспособности человека в средствах индивидуальной защиты [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200012620> (дата обращения: 08.06.2020).

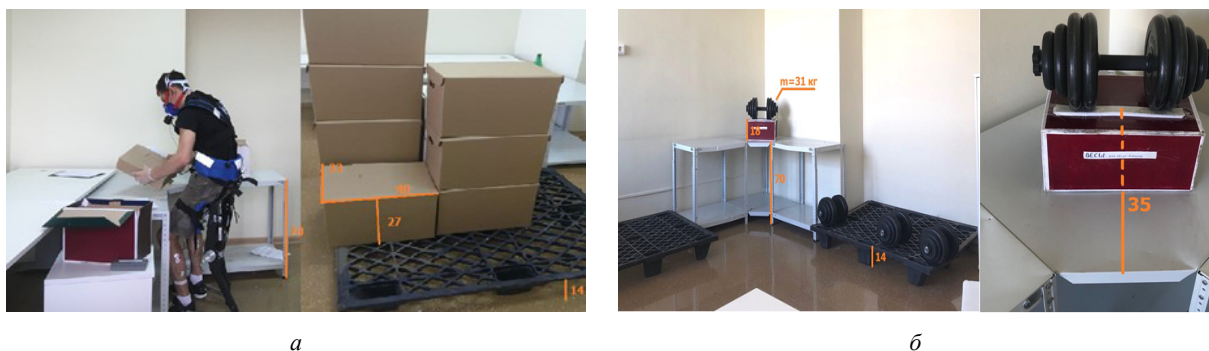


Рис. 1. Модели рабочих мест в лабораторных условиях: *а* – логиста архивно-логистического центра; *б* – кассира отдела по работе с драгоценными металлами главного кассового центра

Испытываемыми образцами являлись: ПЭ Exochair (ООО «Полезные роботы»), предназначенный для уменьшения негативного влияния статических нагрузок на ОДА работников физического труда при поддержании рабочей позы стоя, и EchoAtlant (ООО «Экзоатлант»), предназначенный для уменьшения негативного влияния динамических нагрузок, связанных с подъемом тяжестей и наклонами корпуса.

В качестве добровольцев привлекли шесть практически здоровых мужчин (в возрасте  $27,8 \pm 4,8$  г., ростом  $183,0 \pm 5,8$  см, массой тела  $80,0 \pm 11,1$  кг, с индексом массы тела  $23,3 \pm 2,8$ ), которые до начала исследования были осмотрены врачами-специалистами и по результатам осмотров, функциональных и лабораторных исследований имели верифицированный диагноз «здоров». Каждый из добровольцев осуществлял моделирование трудовой деятельности как без использования ПЭ, так и с его применением.

Безопасность применения ПЭ оценивали по:

- динамике показателей общего состояния добровольцев;
- степени ограничения амплитуд активных движений в крупных суставах конечностей и сочленениях позвоночного столба.

Физиологическую эффективность применения ПЭ оценивали по:

- динамике уровня энергозатрат добровольцев за все время моделирования трудовой деятельности;
- показателям состояния кардиореспираторной системы;
- утомлению скелетной мускулатуры, участвующей в поддержании рабочих поз и выполнении рабочих движений;
- показателям статической координации добровольцев;
- показателям субъективных ощущений и психофизиологического состояния добровольцев;
- показателям производительности труда.

Оценка общего состояния осуществлялась путем врачебного осмотра, включающего в себя внешний осмотр, измерение основных показателей функционального состояния, субъективную оценку добровольцем его ощущений при выполнении

произвольных движений в крупных суставах и позвоночнике, интервьюирование добровольцев на предмет возникновения неприятных или болевых ощущений (оценка по 10-балльной шкале), субъективной оценки ими своего функционального состояния и работоспособности.

С целью определения степени ограничения амплитуд активных движений в крупных суставах конечностей и сочленениях позвоночного столба использовали систему для комплексной объективной оценки двигательных функций, регистрации биомеханики движений и ЭМГ «Биомеханика Траст-М» (ООО «Неврокор», г. Москва, Россия). С помощью инерциальных датчиков регистрировали амплитуды активных движений в крупных суставах верхних, нижних конечностей и позвоночнике.

Для определения энергозатрат добровольцев использовали портативный комплекс ЭСМ-тестирования Metamax 3B (Cortex, Германия) и монитор сердечного ритма Polar H10 (Polar Electro, Финляндия) с эластичным поясом. Показатели газообмена регистрировались автоматически в ходе моделирования рабочей смены.

Для оценки влияния ПЭ на состояние кардиореспираторной системы добровольцев были использованы пробы Руфье, Physical Working Capacity 170, Штанге, Генчи, Серкина, а также активная ортостатическая проба.

Утомление скелетной мускулатуры оценивали путем проведения ЭМГ (с помощью системы для комплексной объективной оценки двигательных функций, регистрации биомеханики движений и ЭМГ «Биомеханика Траст-М») и МТМ (с помощью прибора Myoton PRO (Myoton AS, Эстония)), кистевой и становой динамометрии.

При исследовании физиологической эффективности ПЭ Exochair оценивали состояние мышц спины и нижних конечностей в состоянии покоя в положении добровольца стоя (ЭМГ) или лежа (МТМ); при исследовании ПЭ EchoAtlant – мышц спины и верхних конечностей вне моделирования рабочей деятельности (ЭМГ) в двух положениях добровольца (стоя в рабочей позе с грузом 31 кг, стоя в рабочей позе с тем же грузом с использовани-

ем ПЭ), а также измеряли тонус мышцы, выпрямляющей позвоночник, в положении добровольца в рабочей позе с грузом (МТМ). Кроме того, использовали метод кистевой и становой динамометрии.

Для оценки статической координации добровольцев использовалась стабилметрическая платформа из состава комплекса для лечения и реабилитации больных с двигательными патологиями «Стабилметрия Траст-М» (ООО «Неврокор», Россия). В качестве теста, позволяющего оценить функциональное состояние постуральной системы, использовали тест Ромберга с открытыми и закрытыми глазами.

Определение психофизиологического состояния добровольца проводили с помощью универсального психодиагностического комплекса УПДК-МК (ЗАО «Нейроком», г. Москва). Использовали экспресс-пробу функционального состояния, тесты «Сложная двигательная реакция», «Критическая частота световых мельканий», теппинг-тест. Кроме того, добровольцы по окончании тестирования заполняли анкеты с целью оценки эргономических характеристик экзоскелетов.

При исследовании эффективности применения ПЭ Exochair оценивали динамику показателей производительности труда. Так как одной из составляющих частей трудовой операции логиста архивно-логистического центра ПАО «Сбербанк» является поиск документов в перемещаемых им коробах, за показатель производительности было принято количество найденных документов за период времени. При исследовании ПЭ ExoAtlant моделирование трудовой деятельности осуществляли таким образом, чтобы нагрузка на каждого

добровольца была одинакова и постоянна в течение всей работы, поэтому оценку производительности труда не осуществляли.

Исследование каждого ПЭ проводили в два этапа. На первом этапе осуществляли моделирование трудовой деятельности без применения ПЭ (контрольная группа добровольцев). На втором этапе – с применением ПЭ. Тестирования проводили до начала моделирования трудовой деятельности (фоновые тестирования), в перерывах (промежуточные) и после моделирования (контрольные) одинаково на обоих этапах исследования. Дизайн исследований для каждой модели трудовой деятельности представлен на рис. 2.

Сравнительному анализу подвергали результаты тестирований внутри групп, а также между группами. Полученные результаты подвергали статистической обработке с использованием ПО Statistica 10.0 и MS Office Excel 2019.

**Результаты и их обсуждение.** Данные, полученные в результате исследований с применением большей части методов, в том числе функциональных проб, динамометрии, стабилметрии и психофизиологического тестирования, в большинстве случаев не показали статистически значимых различий между зарегистрированными значениями показателей добровольцев, работающих без ПЭ и с его применением. С большой долей вероятности можно предположить, что данный факт связан с небольшой численностью выборки, индивидуальными особенностями организма добровольцев, значительным влиянием волевого компонента на результаты тестирования.

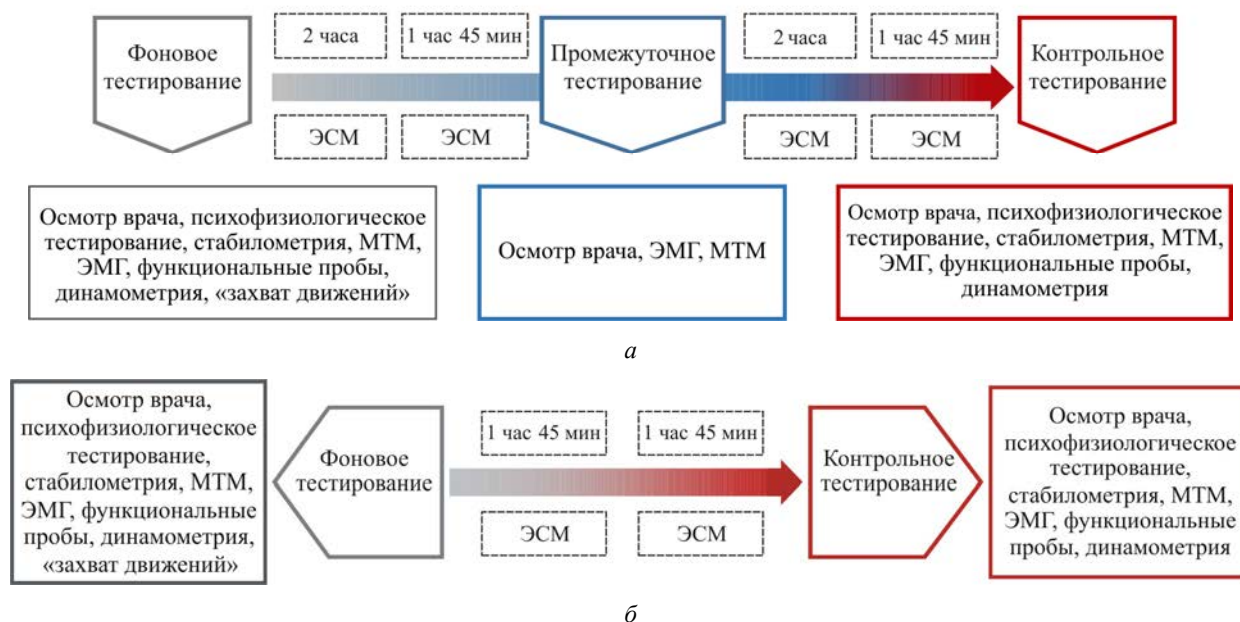


Рис. 2. Дизайн исследования для модели трудовой деятельности: а – логиста архивно-логистического центра (исследование ПЭ Exochair); б – кассира главного кассового отдела (исследование ПЭ ExoAtlant)

При этом у добровольцев, использующих в работе оба ПЭ, частота сердечных сокращений и артериальное давление находились в пределах референсных значений и были адекватны физической нагрузке (как и у контрольной группы). Кроме того, при самооценке добровольцами движений в крупных суставах и позвоночнике, а также в ходе интервьюирования в течение всего моделирования трудовой деятельности было установлено, что использование ПЭ EchoAtlant не вызывает болевых ощущений и каких-либо ограничений амплитуд активных движений в поясничном отделе позвоночника, которые имеют место при вы-

полнении той же работы без применения ПЭ. Вышеуказанное следует расценивать как факты, свидетельствующие о безопасности и физиологической эффективности применения данных ПЭ.

Анализ значений амплитуд активных движений в поясничном отделе позвоночника, крупных суставах верхних и нижних конечностей с использованием инерциальных датчиков показал снижение амплитуд активных движений практически во всех исследуемых суставах. На рис. 3–5 показана динамика амплитуды активных движений в нижних конечностях и позвоночнике при использовании ПЭ Echochair.

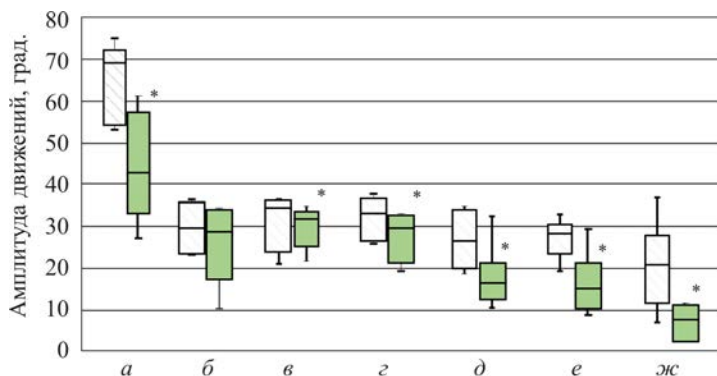


Рис. 3. Амплитуды активных движений в поясничном отделе позвоночника без использования ПЭ Echochair (□) и с его применением (■),  $n = 6$ :

$a$  – наклон вперед,  $b$  – наклон назад,  $v$  – наклон вправо,  $g$  – наклон влево,  $d$  – поворот вправо,  $e$  – поворот влево,  $ж$  – приседание; \* – статистические значимые различия показателей по сравнению с контрольной группой ( $p \leq 0,05$ )

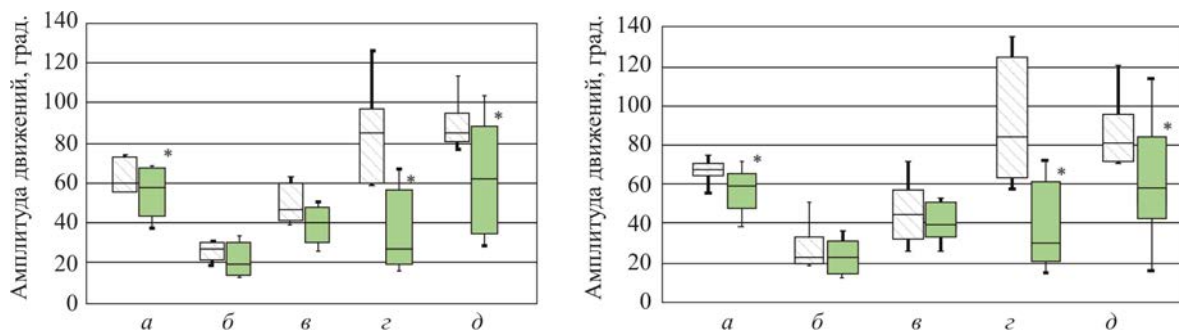


Рис. 4. Амплитуды активных движений в левом (слева) и правом (справа) тазобедренных суставах без использования ПЭ Echochair (□) и с его применением (■),  $n = 6$ :

$a$  – сгибание,  $b$  – разгибание,  $v$  – отведение,  $g$  – присед,  $d$  – подъем ноги;

\* – статистические значимые различия показателей по сравнению с контрольной группой ( $p \leq 0,05$ )

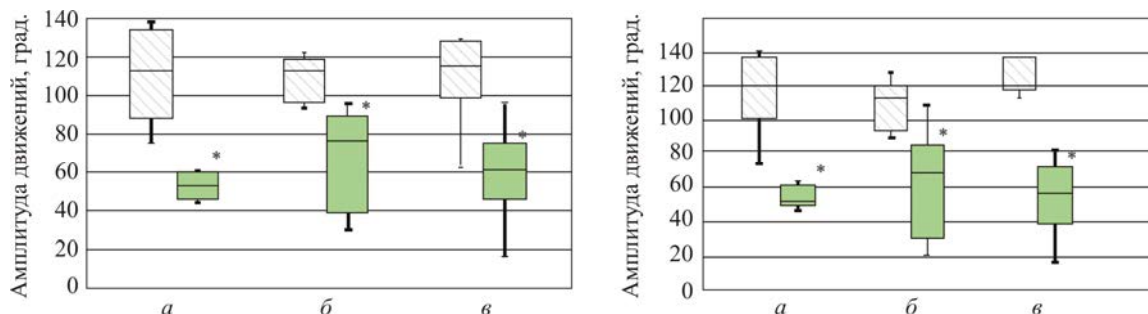


Рис. 5. Амплитуды активных движений в левом (слева) и правом (справа) коленных суставах без использования ПЭ Echochair (□) и с его применением (■),  $n = 6$ :

$a$  – приседание,  $b$  – подъем ноги, согнутой в коленном суставе,  $v$  – сгибание в коленном суставе;

\* – статистические значимые различия показателей по сравнению с контрольной группой ( $p \leq 0,05$ )

Как можно заметить, амплитуды активных движений в пояснично-грудном отделе позвоночника добровольцев, использующих ПЭ Exochair, при наклоне вперед уменьшаются на 32 %, при наклоне влево – на 7 %, вправо – на 13 %, повороте вправо – на 33 %, повороте влево – на 40 %, приседании – на 64 %.

При применении ПЭ Exochair амплитуды активных движений в левом и правом тазобедренных суставах при разгибании снижаются на 3 и 12 %, при приседании – на 67 и 64 %, при подъеме ноги, согнутой в коленном суставе, – на 27 и 28 % соответственно.

Выявлено, что применение данного ПЭ уменьшает амплитуды активных движений в левом и правом коленных суставах при приседании на 54 и 56 %, при подъеме ноги, согнутой в коленном суставе, – на 34 и 41 %, сгибании в коленном суставе – на 47 и 53 % соответственно.

На рис. 6–8 изображены данные, свидетельствующие о наличии ограничений амплитуды активных движений в пояснично-грудном отделе позвоночника, тазобедренных и коленных суставах добровольцев при использовании ПЭ EchoAtlant.

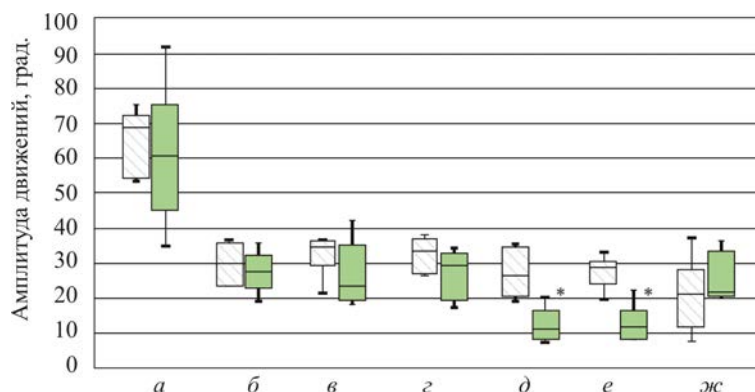


Рис. 6. Амплитуды активных движений в поясничном отделе позвоночника без использования ПЭ EchoAtlant (□) и с его применением (■),  $n = 6$ : а – наклон вперед, б – наклон назад, в – наклон вправо, г – наклон влево, д – поворот вправо, e – поворот влево, ж – приседание; \* – статистические значимые различия показателей по сравнению с контрольной группой ( $p \leq 0,05$ )

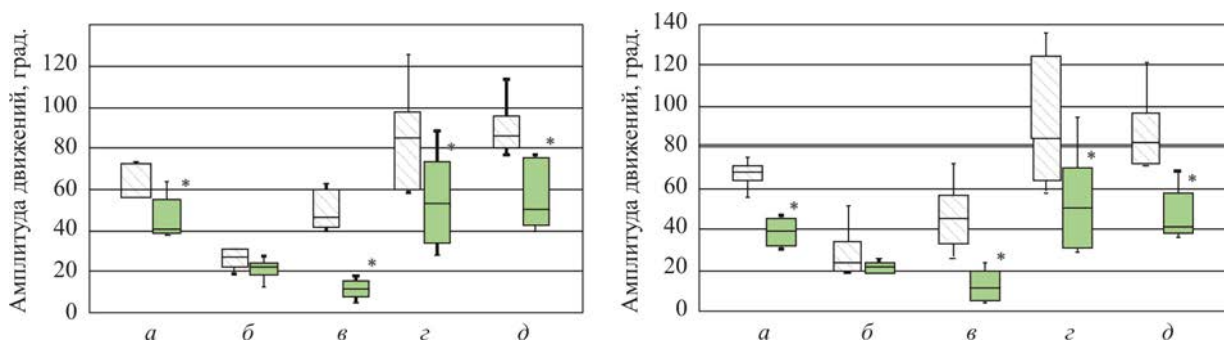


Рис. 7. Амплитуды активных движений в левом (слева) и правом (справа) тазобедренных суставах без использования ПЭ EchoAtlant (□) и с его применением (■),  $n = 6$ : а – сгибание, б – разгибание, в – отведение, г – приседание, д – подъем ноги; \* – статистические значимые различия показателей по сравнению с контрольной группой ( $p \leq 0,05$ )

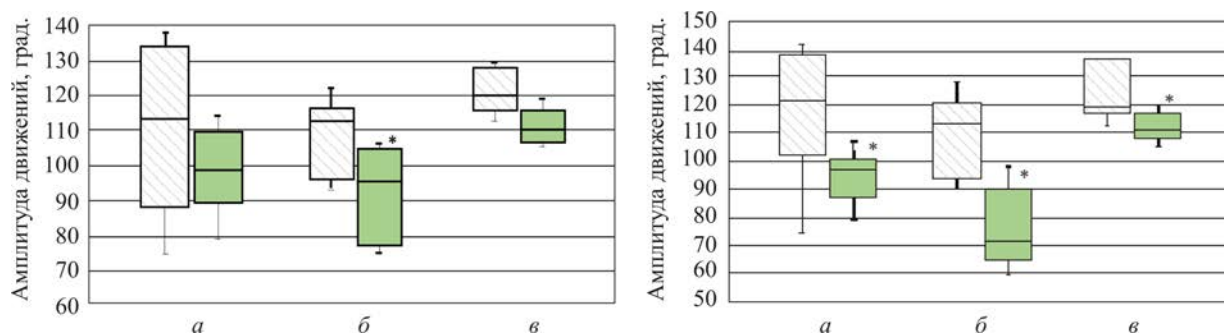


Рис. 8. Амплитуды активных движений в левом (слева) и правом (справа) коленных суставах без использования ПЭ EchoAtlant (□) и с его применением (■),  $n = 6$ : а – приседание, б – подъем ноги, согнутой в коленном суставе, в – сгибание в коленном суставе; \* – статистические значимые различия показателей по сравнению с контрольной группой ( $p \leq 0,05$ )

Установлено, что амплитуды активных движений в пояснично-грудном отделе позвоночника при применении ПЭ EхоAtlant уменьшаются на 55 % при повороте вправо и на 54 % при повороте влево.

Амплитуды активных движений в левом и правом тазобедренных суставах при применении ПЭ EхоAtlant уменьшаются на 32 и 41 % при сгибании, на 74 и 73 % при отведении, на 37 и 39 % при приседании и на 41 и 49 % при подъеме ноги, согнутой в коленном суставе, соответственно.

При применении ПЭ EхоAtlant амплитуды активных движений в правом коленном суставе при приседании уменьшились на 20 %, при подъеме ноги – на 38 %, при сгибании – на 8 %, а также в левом коленном суставе – на 16 % при выполнении подъема ноги, согнутой в коленном суставе.

Выявленный факт наличия ограничений в сочленениях позвоночного столба и суставах нижних конечностей у добровольцев, выполняющих упражнения с использованием ПЭ, позволил нам акцентировать внимание на том, с какой осторожностью необходимо применять ПЭ на производственных объектах, в особенности работникам тех специальностей, трудовые операции которых содержат двигательные действия в более широких амплитудных диапазонах.

Результаты сравнительного анализа данных энергозатрат добровольцев, являющихся, на наш взгляд,

наиболее показательными в вопросе физиологической эффективности применения ПЭ, выявили статистически значимое снижение значений показателей энергозатрат добровольцев при применении ПЭ Eхоchair на 6-м и 8-м часах трудовой деятельности на 5 и 7 % соответственно (рис. 9, а).

Стоит отметить, что наряду со снижением энергозатрат добровольцев в процессе выполнения ими производственных операций показатели производительности их труда практически на каждом часу работы статистически значимо росли (рис. 9, б). Так, количество найденных документов на 1–7-м часах работы увеличилось на 13–38 %.

Некоторые изменения были обнаружены при оценке утомления скелетной мускулатуры добровольцев. Так, при исследовании ПЭ EхоAtlant при проведении ЭМГ в положении добровольцев стоя в рабочей позе с грузом было выявлено снижение биоэлектрической активности мышцы, выпрямляющей позвоночник, справа и слева во время тестирования с применением ПЭ на 24 и 36 % соответственно относительно показателей, полученных при тестировании без применения ПЭ. Вместе с тем биоэлектрическая активность левой двуглавой мышцы плеча в группе добровольцев, использующих ПЭ, на 72 % была выше таковой в контрольной группе (рис. 10).

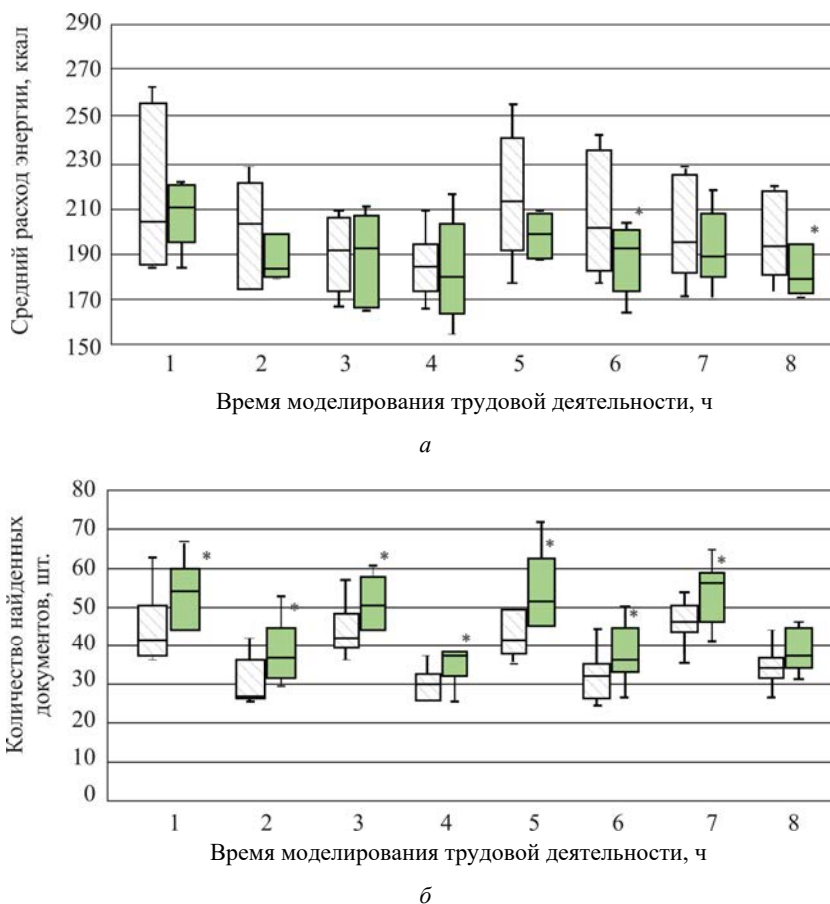


Рис. 9. Динамика показателей добровольцев без использования ПЭ Eхоchair (□) и с его применением (■),  $n = 6$ : а – энергозатрат; б – производительности труда; \* – статистические значимые различия показателей по сравнению с контрольной группой ( $p \leq 0,05$ )

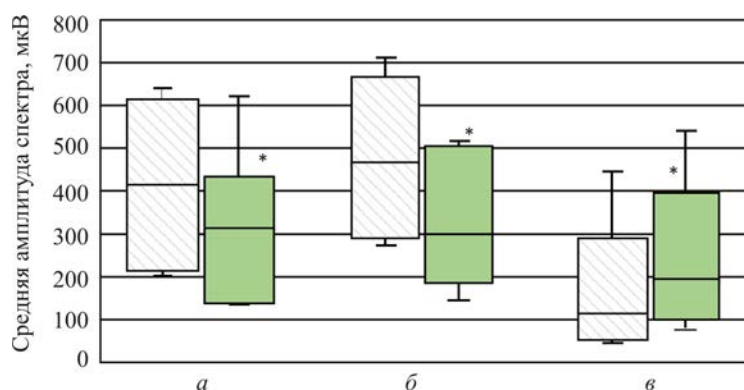


Рис. 10. Динамика биоэлектрической активности мышцы, выпрямляющей позвоночник справа (а) и слева (б), двуглавой мышцы плеча слева (в) у добровольцев, находящихся в рабочей позе с грузом без использования ПЭ ExoAtlant (□), и с его применением (■),  $n = 6$ ; \* – статистические значимые различия показателей по сравнению с контрольной группой

Вышеописанные изменения позволяют сделать вывод о снижении активности мышцы, выпрямляющей позвоночник, за счет ее разгрузки с помощью ПЭ. При этом увеличение показателя для бицепса плеча слева может свидетельствовать о возможном перераспределении нагрузки со спины на верхние конечности.

Результаты МТМ-исследования в положении добровольцев лежа на кушетке в состоянии покоя в контрольных тестированиях показали статистически значимое снижение тонуса поясничной части мышцы, выпрямляющей позвоночник, справа на 4 % и слева на 3 %, полусухожильной мышцы – справа на 3 % и медиальной широкой мышцы бедра с обеих сторон (на 4 % – справа и 5 % – слева) в контрольных тестированиях по сравнению с фоновыми в группе, использующей ПЭ Exochair (рис. 11). Выявленные изменения могут свидетельствовать, что в конце работы данные мышцы находились в состоянии меньшего напряжения, чем в начале. Ввиду отсутствия аналогичных изменений в контрольной группе добровольцев, можно предположить, что применение ПЭ Exochair уменьшает нагрузку на некоторые мышцы спины и бедер, участвующие в поддержании рабочих поз и выполнении рабочих движений.

Касательно МТМ мышцы, выпрямляющей позвоночник, во время максимального напряжения – в рабочей позе с грузом массой 31 кг было установлено, что показатели тонуса длиннейшей мышцы груди справа и слева, а также подвздошно-реберной мышцы поясницы справа после окончания работы были ниже соответствующих значений до ее начала на 10; 13 и 17 % соответственно в группе, работающей с применением ПЭ ExoAtlant, что в совокупности с отсутствием подобных изменений в контрольной группе косвенно может свидетельствовать о снижении нагрузки на данные мышцы за счет ПЭ (рис. 12).

Тем не менее, принимая во внимание особенность работы миотонометра, связанную со сложностью измерения показателей тонуса глубоко расположенных и малых по размеру мышц, отсутствие унифицированных норм измеряемых параметров и значительной доказательной базы, а также экспериментальный характер самой методики, вопрос диагностики утомления скелетных мышц для физиолого-эргономической оценки ПЭ с использованием МТМ требует дальнейшего детального изучения.

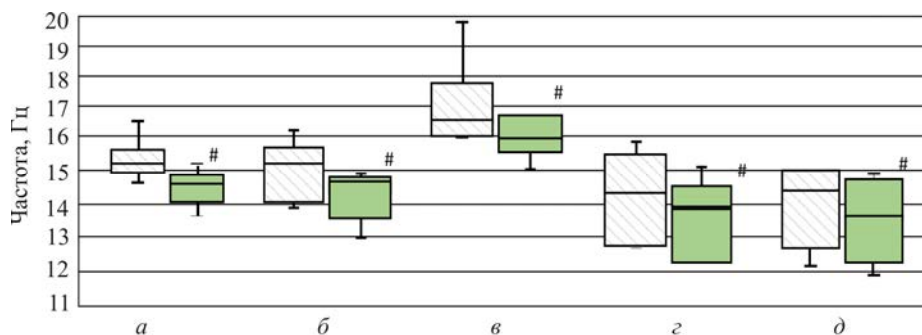


Рис. 11. Тонус подвздошно-реберной мышцы поясницы справа (а) и слева (б), полусухожильной мышцы справа (в), медиальной широкой мышцы бедра справа (г) и слева (д) у добровольцев, использующих ПЭ Exochair до начала моделирования трудовой деятельности (□) и после его окончания (■),  $n = 6$ ; # – статистические значимые различия показателей по сравнению с фоновыми значениями



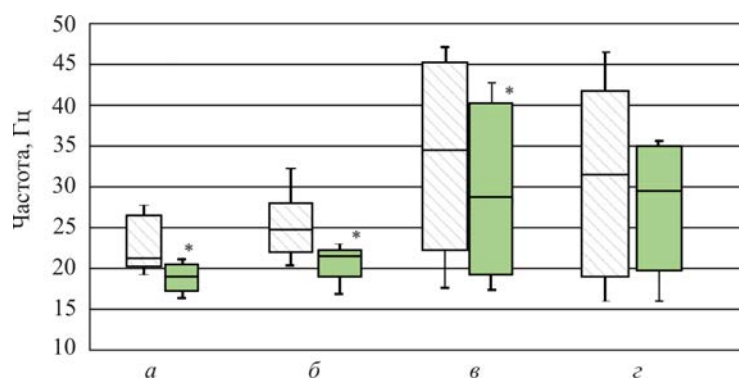


Рис. 12. Тонус длинной мышцы груди справа (а) и слева (б), подвздошно-реберной мышцы справа (в) и слева (г) до начала моделирования трудовой деятельности (□) и после ее окончания (■) у добровольцев, использующих ПЭ EchoAtlant,  $n = 6$ ; \* – статистические значимые различия показателей по сравнению с фоновыми значениями

При анализе анкет, заполненных добровольцами после работы с применением ПЭ Exochair, установлено, что наиболее высоко они оценили следующие параметры: внешний вид ПЭ, самочувствие при применении ПЭ и его помощь в процессе работы. По мнению добровольцев, наиболее неудовлетворительные параметры это: процедура надевания / снятия, ограничение движений, удобство передвижения в ПЭ, дискомфорт от расположения на теле и вес ПЭ.

Большее число положительных оценок получили эргономические характеристики ПЭ EchoAtlant, среди которых: внешний вид, размер, масса, удобство снятия и надевания ПЭ, его расположение на теле, удобство обслуживания, самочувствие во время работы с применением ПЭ и его помощь в работе, отсутствие негативных ощущений за все время работы в данном ПЭ. Однако удобство передвижения и ограничение движений, так же, как и в случае с ПЭ Exochair, были оценены невысоко.

Очевидно, что перечисленные свойства применяемых ПЭ способствуют повышению или уменьшению общего эффекта напряжения в процессе работы, способны оказывать влияние как на состояние работника, так и на качество выполнения работы. Следовательно, дальнейшее детальное изучение и оценка всевозможных характеристик ПЭ работниками, для которых они предназначены, а также более длительное его применение в течение нескольких рабочих смен позволит устранить эти недостатки.

**Выводы.** Современные подходы к определению функционального состояния человека, включающие «захват движений» с использованием инерциальных датчиков, эргоспирометрию, электромиографию и мионометрию позволяют проводить объективную медико-биологическую оценку безопасности и эффективности применения промышленных экзоскелетов в лабораторных условиях.

Результаты настоящего исследования с использованием вышеперечисленных методов под-

твердили безопасность и эффективность применения промышленных экзоскелетов Exochair и EchoAtlant для логиста архивно-логистического центра и кассира отдела по работе с драгоценными металлами главного кассового центра ПАО «Сбербанк» соответственно. Тем не менее заключение о безопасности и эффективности применения данных образцов промышленных экзоскелетов на рабочих местах в натуральных условиях целесообразно формировать отдельно, с учетом результатов настоящей работы, особенностей производства, в том числе наличия вредных и (или) опасных факторов, характеристик технологического процесса, производственных операций, используемого оборудования и пр. В первую очередь это обусловлено тем, что применение исследуемых промышленных экзоскелетов существенно ограничивает амплитуды ряда простых движений, что может негативно сказываться на осуществлении работником тех или иных рабочих операций, а также вызывать значительные неудобства при возникновении нештатных ситуаций на производстве.

Некоторые из используемых в настоящей работе методик, среди которых проведение функциональных проб, динамометрии, стабилometрии и психофизиологического тестирования, показали невысокую надежность и валидность, что ставит под вопрос целесообразность их применения в последующих исследованиях.

Использованные в настоящей работе методы могут существенно расширить имеющиеся подходы к исследованию функционального состояния работников физического труда, а полученные результаты внесут значимый вклад в разработку нормативно-технической базы перспективного типа средств индивидуальной защиты опорно-двигательного аппарата в рамках системы стандартов безопасности труда.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Список литературы

1. Lowe B.D., Billotte W.G., Peterson D.R. ASTM F48 Formation and Standards for Industrial Exoskeletons and Exosuits // IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors. – 2019. – Vol. 7, № 3–4. – P. 230–236. DOI: 10.1080/24725838.2019.1579769
2. Ford rolls out exoskeleton wearable technology globally to help lessen worker fatigue, injury [Электронный ресурс] // Ford media center. – 2018. – URL: <https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2018/08/07/ford-rolls-out-exoskeleton-wearable-technology-globally-to-help-.html> (дата обращения: 08.06.2020).
3. Honda Xcelerator to Debut Industrial Innovation Collaborations at CES 2020 Along with New Technologies Coming Soon to Market [Электронный ресурс] // Honda. The Power of Dreams. – 2019. – URL: <https://hondanews.com/en-US/honda-corporate/releases/release-8d5607d2f6277f4e7a40db54620873de-honda-xcelerator-to-debut-industrial-innovation-collaborations-at-ces-2020-along-with-new-technologies-coming-soon-to-market> (дата обращения: 08.06.2020).
4. Hyundai Develops Wearable Vest Exoskeleton for overhead work [Электронный ресурс] // Hyundai Motor Europe. – 2019. – URL: <https://www.hyundai.news/eu/brand/hyundai-develops-wearable-vest-exoskeleton-for-overhead-work/> (дата обращения: 08.06.2020).
5. White Paper: Hip Exoskeleton Market – Review of Lift Assist Wearables [Электронный ресурс] // Industry News & Education. – 2018. – URL: <http://www.wearablerobotics.com/industry-news-education/> (дата обращения: 08.06.2020).
6. Доспехи для рабочего [Электронный ресурс] // Коммерсантъ. – 2019. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4088692> (дата обращения: 08.06.2020).
7. Аникиенко Е. Магнитогорцы показали экзоскелет на Неделе моды в Москве [Электронный ресурс] // Южноуральская панорама. – 2019. – URL: <http://ur74.ru/articles/news/115137/> (дата обращения: 08.06.2020).
8. Колерова В. Экзоскелеты медленно идут в цеха [Электронный ресурс] // Эксперт. – 2018. – № 29. – URL: <https://expert.ru/expert/2018/29/ekzoskeletyi-medlenno-idut-v-tseha/> (дата обращения: 08.06.2020).
9. Приобретение 30 экзоскелетов Exorise // Tadviser. – 2019. – URL: [http://www.tadviser.ru/index.php/Проект:Череповецкий\\_металлургический\\_комбинат\\_\(ЧерМК\)\\_\\_\(Экзоскелеты\\_Exorise\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Проект:Череповецкий_металлургический_комбинат_(ЧерМК)__(Экзоскелеты_Exorise)) (дата обращения: 08.06.2020).
10. Biomechanical and Metabolic Effectiveness of an Industrial Exoskeleton for Overhead Work / T. Schmalz, J. Schändlinger, M. Schuler, J. Bornmann // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2019. – Vol. 16, № 23. – P. 4792. DOI: 10.3390/ijerph16234792
11. Objective and Subjective Effects of a Passive Exoskeleton on Overhead Work / P. Maurice, J. Čamernik, D. Gorjan, B. Schirmeister, J. Bornmann, L. Tagliapietra, C. Latella, D. Pucci [et al.] // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. – 2020. – Vol. 28, № 1. – P. 152–164. DOI: 10.1109/TNSRE.2019.2945368
12. Comparison of the human-exosuit interaction using ankle moment and ankle positive power inspired walking assistance / M. Grimmer, B.T. Quinlivan, S. Lee, P. Malcolm, D.M. Rossi, C. Sivi, C.J. Walsh // Journal of Biomechanics. – 2019. – Vol. 83, № 23. – P. 76–84. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2018.11.023
13. The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work / T. Bosch, J. Eck, K. Knitel, M. Looze // Applied Ergonomics. – 2016. – Vol. 54. – P. 212–217. DOI: 10.1016/j.apergo.2015.12.003
14. Industrial Wearable Exoskeletons and Exosuits Assessment Process / J. Masood, A. Dacal-Nieto, V. Alonso-Ramos, M.I. Fontano, A. Voilqué, J. Bou // Wearable Robotics: Challenges and Trends. – 2018. – Vol. 22. – P. 234–238. DOI: 10.1007/978-3-030-01887-0\_45
15. Reliability of a portable device for quantifying tone and stiffness of quadriceps femoris and patellar tendon at different knee flexion angles / G. Chen, J. Wu, G. Chen, Y. Lu, W. Ren, W. Xu, X. Xu, Z. Wu [et al.] // PLoS ONE. – 2019. – Vol. 14, № 7. DOI: 10.1371/journal.pone.0220521
16. Lumbar muscles biomechanical characteristics in young people with chronic spinal pain / W.L.A. Lo, Q. Yu, Y. Mao, W. Li, Ch. Hu, L. Li // BMC Musculoskelet Disord. – 2019. – Vol. 23, № 20 (1). – P. 559. DOI: 10.1186/s12891-019-2935-z
17. Скворцов Д.В. Диагностика двигательной патологии инструментальными методами: анализ походки, стабилометрия: монография. – М.: Научно-медицинская фирма «МБН», 2007. – 640 с.
18. Гамза Н.А., Гринь Г.Р., Жукова Т.В. Функциональные пробы в спортивной медицине. – Минск: Белорусский государственный университет физической культуры, 2012. – 57 с.

*Современные методы исследования безопасности и физиологической эффективности применения промышленных экзоскелетов / А.М. Герегей, Е.С. Шитова, И.С. Малахова, Е.С. Шупорин, Е.В. Бондарук, А.Р. Ефимов, В.Х. Тах // Анализ риска здоровью. – 2020. – № 3. – С. 148–159. DOI: 10.21668/health.risk/2020.3.18*

Research article

## UP-TO-DATE TECHNIQUES FOR EXAMINING SAFETY AND PHYSIOLOGICAL EFFICIENCY OF INDUSTRIAL EXOSKELETONS

**A.M. Geregei<sup>1</sup>, E.S. Shitova<sup>1</sup>, I.S. Malakhova<sup>1</sup>, E.S. Shuporin<sup>1</sup>,  
E.V. Bondaruk<sup>1,3</sup>, A.R. Efimov<sup>2,3</sup>, V.Kh. Takh<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Izmerov's Research Institute of Occupational Health, 31 Budennogo Ave., Moscow, 105275, Russian Federation

<sup>2</sup>Public Joint Stock Company «Sberbank of Russia», 19 Vavilova Str., Moscow, 117997, Russian Federation

<sup>3</sup>National University of Science and Technology «MISIS», 4 Leninskii Ave., Moscow, 119049, Russian Federation

*Occupational morbidity caused by physical overloads and certain organs and systems being overstrained ranks second among occupational pathologies depending on an influencing adverse occupational factor. Given that, it seems vital and promising to develop industrial exoskeletons as they are able to protect a worker's musculoskeletal system from excessive physical loads. And absence of a relative regulatory and technologic base is a challenge here as it imposes substantial limitations on industrial exoskeletons implementation in productions both in Russia and in other countries.*

*A significant role in creating regulatory and technological base belongs to a possibility to accomplish an objective medical and biological examination of industrial exoskeletons safety and physiological efficiency. Developed and properly tested procedures for examining physiological and ergonomic properties of industrial exoskeletons will make a substantial contribution into a system of complex ergonomic tests accomplished at stages when exoskeletons are developed, created, and put into trial operation.*

*The present paper dwells on up-to-date medical and biological procedures for examining safety and physiological efficiency of industrial exoskeletons. There are examples on using a «movement seizure» procedure performed with inertial sensors, ergospirometry, electromyography, and myotonometry for estimating physiological and ergonomic properties of industrial exoskeletons at a modeled working place.*

*Results obtained via this research involving all the above mentioned procedures confirmed that it was safe and quite efficient to apply industrial exoskeletons for workers who had to deal with physical labor when performing work tasks similar to those used in developed models. Applied procedures can substantially enhance approaches to examining a worker's functional state and obtained results will make a significant contribution into development of a regulatory and technological base for promising individual protection means used to protect the musculoskeletal system within the existing System of occupational safety standards.*

**Key words:** industrial exoskeletons, individual protection means, biomechanical analysis of movements, ergospirometry, electromyography, myotonometry.

### References

1. Lowe B.D., Billotte W.G., Peterson D.R. ASTM F48 Formation and Standards for Industrial Exoskeletons and Exosuits. *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 2019, vol. 7, no. 3–4, pp. 7. DOI: 10.1080/24725838.2019.1579769

2. Ford rolls out exoskeleton wearable technology globally to help lessen worker fatigue, injury. *Ford media center*, 2018. Available at: <https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2018/08/07/ford-rolls-out-exoskeleton-wearable-technology-globally-to-help-.html> (08.06.2020).

© Geregei A.M., Shitova E.S., Malakhova I.S., Shuporin E.S., Bondaruk E.V., Efimov A.R., Takh V.Kh., 2020

**Andrei M. Geregei** – Head of the Laboratory for Individual Protection Means and Exoskeletons (e-mail: ppe-lab@irioh.ru; tel.: +7 (925) 083-25-55; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7927-2505>).

**Evgeniya S. Shitova** – Junior researcher at the Laboratory for Individual Protection Means and Exoskeletons (e-mail: shitova.zhe@gmail.com; tel.: +7 (996) 441-85-09; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4379-5187>).

**Inga S. Malakhova** – Junior researcher at the Laboratory for Individual Protection Means and Exoskeletons (e-mail: malahova.is@mail.ru; tel.: +7 (981) 784-07-29; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3215-3517>).

**Evgenii S. Shuporin** – Junior researcher at the Laboratory for Individual Protection Means and Exoskeletons (e-mail: doctorshuporin@gmail.com; tel.: +7 (910) 481-34-38; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7590-431X>).

**Evgeniya V. Bondaruk** – Junior researcher at the Laboratory for Individual Protection Means and Exoskeletons (e-mail: evegena@gmail.com; tel.: +7 (926) 826-56-63; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3762-0636>).

**Al'bert R. Efimov** – Vice-president and Director of the Department for Research and Innovations of Russia», Senior lecturer at Engineering Cybernetics Department (e-mail: arefimov@sberbank.ru; tel.: +7 (916) 188-18-11; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6857-8659>).

**Vladimir Kh. Takh** – Supervisor at the Robot Techniques Center (e-mail: sugggar@yandex.ru; tel.: +7 (929) 237-37-76; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9611-2992>).

3. Honda Xcelerator to Debut Industrial Innovation Collaborations at CES 2020 Along with New Technologies Coming Soon to Market. *Honda. The Power of Dreams*, 2019. Available at: <https://hondanews.com/en-US/honda-corporate/releases/release-8d5607d2f6277f4e7a40db54620873de-honda-xcelerator-to-debut-industrial-innovation-collaborations-at-ces-2020-along-with-new-technologies-coming-soon-to-market> (08.06.2020).
4. Hyundai Develops Wearable Vest Exoskeleton for overhead work. *Hyundai Motor Europe*, 2019. Available at: <https://www.hyundai.news/eu/brand/hyundai-develops-wearable-vest-exoskeleton-for-overhead-work/> (08.06.2020).
5. White Paper: Hip Exoskeleton Market – Review of Lift Assist Wearables. *Industry News & Education*, 2018. Available at: <http://www.wearablerobotics.com/industry-news-education/> (08.06.2020).
6. Dospekhi dlya rabochego [Armor for a worker]. *Kommersant*, 2019. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/4088692> (08.06.2020) (in Russian).
7. Anikienko E. Magnitogorsky pokazali ekzoskelet na Nedele mody v Moskve [Experts from Magnitogorsk showed an exoskeleton at fashion Week in Moscow]. *Yuzhnoural'skaya panorama*, 2019. Available at: <http://up74.ru/articles/news/115137/> (08.06.2020) (in Russian).
8. Kolerova V. Ekzoskelety medlenno idut v tsekha [Exoskeletons are being introduced in workshops, though rather slowly]. *Ekspert*, 2018, no. 29. Available at: <https://expert.ru/expert/2018/29/ekzoskeletyi-medlenno-idut-v-tseha/> (08.06.2020) (in Russian).
9. Priobretenie 30 ekzoskeletov Exorise [Purchase of 30 Exorise exoskeletons]. *Tadviser*, 2019. Available at: [http://www.tadviser.ru/index.php/Проект:Череповецкий\\_металлургический\\_комбинат\\_\(ЧерМК\)\\_Экзоскелеты\\_Exorise](http://www.tadviser.ru/index.php/Проект:Череповецкий_металлургический_комбинат_(ЧерМК)_Экзоскелеты_Exorise) (08.06.2020) (in Russian).
10. Schmalz T., J. Schändlinger, Schuler M., Bornmann J. Biomechanical and Metabolic Effectiveness of an Industrial Exoskeleton for Overhead Work. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, vol. 16, no. 23, pp. 4792. DOI: 10.3390/ijerph16234792
11. Maurice P., Čamerlik J., Gorjan D., Schirmmeister B., Bornmann J., Tagliapietra L., Latella C., Pucci D. [et al.]. Objective and Subjective Effects of a Passive Exoskeleton on Overhead Work. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2020, vol. 28, no. 1, pp. 152–164. DOI: 10.1109/TNSRE.2019.2945368
12. Grimmer M., Quinlivan B.T., Lee S., Malcolm P., Rossi D.M., Siviyy C., Walsh C.J. Comparison of the human-exosuit interaction using ankle moment and ankle positive power inspired walking assistance. *Journal of Biomechanics*, 2019, vol. 83, no. 23, pp. 76–84. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2018.11.023
13. 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 vol. 54, pp. 212–217. DOI: 10.1016/j.apergo.2015.12.003
14. Masood J., Dacal-Nieto A., Alonso-Ramos V., Fontano M.I., Voilqué A., Bou J. Industrial Wearable Exoskeletons and Exosuits Assessment Process. *Wearable Robotics: Challenges and Trends*, vol. 22, pp. 234–238. DOI: 10.1007/978-3-030-01887-0\_45
15. Chen G., Wu J., Chen G., Lu Y., Ren W., Xu W., Xu X., Wu Z. [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, vol. 14, no. 7. DOI: 10.1371/journal.pone.0220521
16. Lo W.L.A., Yu Q., Mao Y., Li W., Hu Ch., Li L. Lumbar muscles biomechanical characteristics in young people with chronic spinal pain. *BMC Musculoskelet Disord*, 2019, vol. 23, no. 20 (1), pp. 559. DOI: 10.1186/s12891-019-2935-z
17. Skvortsov D.V. Diagnostika dvigatel'noi patologii instrumental'nymi metodami: analiz pokhodki, stabilometriya: monografiya [Motor pathology diagnostics with instrumental procedures: gait analysis and stabilometry: a monograph]. Moscow, Nauchno-meditsinskaya firma «MBN» Publ., 2007, 640 p. (in Russian).
18. Gamza N.A., Grin' G.R., Zhukova T.V. Funktsional'nye proby v sportivnoi meditsine [Functional tests in sport medicine]. Minsk, Belorusskii gosudarstvennyi universitet fizicheskoi kul'tury Publ., 2012, 57 p. (in Russian).

*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, no. 3, pp. 148–159. DOI: 10.21668/health.risk/2020.3.18.eng*

Получена: 10.06.2020

Принята: 18.08.2020

Опубликована: 30.09.2020