

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

DOI: <http://dx.doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-7-412-416>

УДК 613.65

© Коллектив авторов, 2019

Орлов И.А.¹, Алисейчик А.П.¹, Меркулова А.Г.², Комарова С.В.², Белая О.В.², Грибков Д.А.¹, Подопрсветов А.В.¹, Павловский В.Е.¹, Ефимов А.Р.³, Бетц К.В.²**Актуальность использования промышленных экзоскелетов для снижения количества профессиональных заболеваний опорно-двигательного аппарата верхней части тела**¹ФГУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша» РАН, Миусская пл., 4, Москва, Россия, 125047;²ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», пр-т Буденного, 31, Москва, Россия, 105275;³Центр робототехники ПАО «Сбербанк», ул. Вавилова, 23/1, Москва, Россия, 117312

В различных отраслях экономики тяжелый физический труд остается ведущим фактором риска получения травм, развития профессиональных и производственно обусловленных заболеваний, в том числе опорно-двигательного аппарата. Значительная доля патологий приходится на заболевания скелетно-мышечной системы плечевого пояса, приводящие к временной утрате трудоспособности, потере рабочего времени и увеличению экономических расходов. Применение промышленных экзоскелетов позволит повысить уровень автоматизации производственных операций и является актуальным в отраслях, где работник — неотъемлемая часть трудового процесса. Внедрение промышленных экзоскелетов позволит снизить тяжесть труда путем оптимального перераспределения нагрузки на различные части опорно-двигательного аппарата. Промышленный экзоскелет представляет собой внешнюю механическую несущую конструкцию, которая прикрепляется к телу человека с помощью манжет и предназначена для ассистирования при выполнении производственных движений. Наиболее эффективными для разгрузки мышц верхней части тела работника являются промышленные экзоскелеты, направленные на удержание тяжелого инструмента и поддержание оптимальной рабочей позы. Большинство доступных промышленных экзоскелетов, прошедших испытания на предприятиях, являются пассивными, в перспективе необходима разработка легких мобильных активных экзоскелетов с габаритами, оптимальными для рабочего пространства. Актуальным направлением исследований является обоснование и разработка требований к конструкции промышленных экзоскелетов, стандартизированных критериев и методов оценки их безопасности и эффективности защиты работника от воздействия физических перегрузок, являющихся вредным производственным фактором.

Ключевые слова: профессиональные заболевания; опорно-двигательный аппарат; физический труд; промышленные экзоскелеты

Для цитирования: Орлов И.А., Алисейчик А.П., Меркулова А.Г., Комарова С.В., Белая О.В., Грибков Д.А., Подопрсветов А.В., Павловский В.Е., Ефимов А.Р., Бетц К.В. Актуальность использования промышленных экзоскелетов для снижения количества профессиональных заболеваний опорно-двигательного аппарата верхней части тела. *Мед. труда и пром. экол.* 2019; 59 (7). <http://dx.doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-7-412-416>

Для корреспонденции: Орлов Игорь Александрович, науч. сотр., рук. лаб. бионической робототехники ФГУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша» РАН, канд. физ.-мат. наук. E-mail: i.orlov@keldysh.ru.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №18–71–10112).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Igor A. Orlov¹, Anton P. Aliseychik¹, Anastasia G. Merkulova², Sofya V. Komarova², Olga V. Belaya², Dmitry A. Gribkov¹, Alexey V. Podoprosvetov¹, Vladimir E. Pavlovsky¹, Albert R. Efimov³, Kristina V. Bets²

The relevance of the use of industrial exoskeletons to reduce the number of occupational diseases of the musculoskeletal system of the upper body¹Keldysh Institute of Applied Mathematics; 4, Miusskaya sq., Moscow, 125047;²Izmerov Research Institute of Occupational Health, 31, Budennogo Ave., Moscow, Russia, 105275;³Sberbank Robotics Laboratory, 23/1, Vavilova str., Moscow, 117312

In various sectors of the economy, heavy physical labor remains a leading risk factor for injury, the development of occupational and occupational diseases, including musculoskeletal system. A significant proportion of pathologies are diseases of the musculoskeletal system of the shoulder girdle, leading to temporary disability, loss of working time and increased economic costs. The use of industrial exoskeletons will increase the level of automation of production operations and is relevant in industries where the employee is an integral part of the labor process. The introduction of industrial exoskeletons will reduce the burden of labor by optimal redistribution of load on various parts of the musculoskeletal system. The industrial

exoskeleton is an external mechanical support structure that attaches to the human body by means of cuffs and is designed to assist in performing production movements. The most effective for unloading the muscles of the upper body of the employee are industrial exoskeletons aimed at holding a heavy tool and maintaining an optimal working posture. Most of the available industrial exoskeletons tested at the enterprises are passive, in the future it is necessary to develop light mobile active exoskeletons with dimensions optimal for the working space. The actual direction of research is the substantiation and development of requirements for the design of industrial exoskeletons, standardized criteria and methods for assessing their safety and efficiency of protecting the employee from the effects of physical overload, which is a harmful production factor.

Key words: *occupational diseases; musculoskeletal system; physical labor; industrial exoskeletons*

For citation: Orlov I.A., Aliseychik A.P., Merkulova A.G., Komarova S.V., Belaya O.V., Gribkov D.A., Podoprosvetov A.V., Pavlovsky V.E., Efimov A.R., Betz K.V. The relevance of the use of industrial exoskeletons to reduce the number of occupational diseases of musculoskeletal system of the upper body. *Med. truda i prom. ekol.* 2019; 59 (7). <http://dx.doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-7-412-416>

For correspondence: Igor A. Orlov, research scientist, Head of bionic robotics laboratory of Keldysh Institute of Applied Mathematics, Cand. of Sci. (Mat.). E-mail: i. orlov@keldysh.ru

Funding: The study was performed by a grant of Russian scientific Foundation (project No. 18–71–10112).

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

Скелетно-мышечные нарушения вследствие воздействия фактора тяжести трудового процесса являются наиболее часто встречающейся причиной профессиональной нетрудоспособности. Значимыми показателями данного фактора являются: подъем и перемещение тяжелых грузов, статические и динамические нагрузки, а также нерациональные рабочие позы и глубокие наклоны корпуса.

В настоящее время доля тяжелого физического труда в промышленной сфере постепенно сокращается. Тем не менее, еще существует ряд профессий, физический труд которых превышает допустимые гигиенические нормы. Физические нагрузки, воздействующие на рабочих различных профессий, например, сборщиков, монтажников, строителей, грузчиков, бурильщиков, кузнецов, сварщиков, приводят к многочисленным травмам, профессиональным и производственно обусловленным заболеваниям опорно-двигательного аппарата (ОДА).

Следует отметить, что существенные величины показателей тяжести трудового процесса не только определяют характером труда, но и связаны с недостаточным учетом требований эргономики при конструировании производственного оборудования и организации рабочих мест.

По данным Европейского фонда улучшения условий жизни и труда [1], в странах ЕС наиболее распространенными факторами риска для здоровья работающих являются различные физические нагрузки, в том числе стереотипные движения рук, перенос тяжелых грузов, неудобные и вынужденные рабочие позы, которым подвергается около 61% работников. Наибольшему риску подвергаются работники физического труда в строительстве, сельском хозяйстве, промышленности, на транспорте и в здравоохранении. Стереотипные рабочие движения выполняют около 30% как мужчин, так и женщин в течение четверти или более рабочего времени, нагрузкам вследствие неудобной рабочей позы подвергаются более 30% и мужчин, и женщин. Следствием воздействия неблагоприятных факторов физического труда является развитие различных заболеваний скелетно-мышечной системы, в частности 43% работающих страдают от болей в спине, 42% — от мышечных болей в шее и плечевом поясе, 29% — от мышечных болей в ногах.

По данным Государственного доклада «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в РФ в 2017 году» [2], основная доля профессиональной патологии вследствие физических перегрузок и перенапряжения отдельных органов и систем принадлежит радикулопатиям различной локализации (пояснично-крестцовой, шейно-плечевой и др.) — 67,47%. На долю

моно- и полинейропатий приходится 16,37%, периапартроз и деформирующих остеоартрозов — 7,89%, прочих заболеваний — 8,28%.

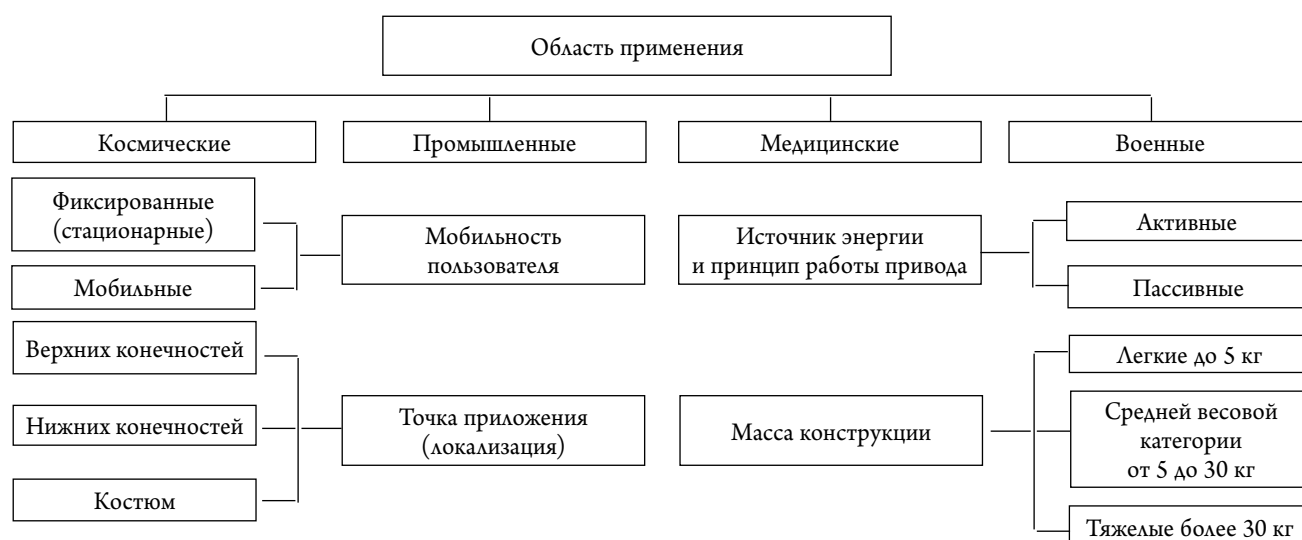
Наиболее высокие показатели профессиональной заболеваемости выявлены на предприятиях по добыче полезных ископаемых (56,13%), обрабатывающих производствах (14,84%), предприятиях сельского, лесного хозяйства, охоты, рыболовства и рыбоводства (10,14%), транспортировки и хранения (8,42%), строительства (7,36%) [3].

В ЕС порядка 44 млн рабочих подвержены заболеваниям скелетно-мышечной системы, что приводит к затратам порядка 240 млрд евро ежегодно [4]. Заболевания костно-мышечного аппарата плечевого пояса требуют длительного восстановительного периода, что приводит к потерям рабочего времени. В США травмы плеча приводят к потере 23 рабочих дней, в то время как травмы спины и травмы прочих локализаций — 7 и 9 дней соответственно [5].

Эксперты ВОЗ считают, что экономические потери «по причине проблем здоровья, связанных с работой» в большинстве стран мира составляют от 4 до 6% валового национального продукта. По оценке ФГБУ «ВНИИ труда» Минтруда России, экономические потери России по причине неудовлетворительного состояния условий и охраны труда работников составляют ежегодно около 1,94 трлн рублей, или 4,3% валового внутреннего продукта. Общие потери складываются из прямых и косвенных потерь фонда рабочего времени, составляющих свыше 75%, а также расходов Фонда социального страхования РФ, Пенсионного и др. [6].

Фактические расходы на компенсации работникам, занятым на работах во вредных и (или) опасных условиях труда на крупных, средних и выборочно малых предприятиях, в 2016 году по данным Росстата составили 193,4 млрд рублей, включая расходы на проведение медицинских осмотров и приобретение средств индивидуальной защиты. При этом величина фактических расходов на компенсации, проведение медицинских осмотров и приобретение средств индивидуальной защиты постоянно увеличивается [7].

Применение автоматических устройств, предназначенных для осуществления производственных операций, является современным способом минимизации риска развития профессиональных заболеваний ОДА и потерь от несчастных случаев, причиной которых является человеческий фактор. Однако полная автоматизация производства является дорогим решением и не всегда возможна, а также не может быть применима в технологических операциях, в которых необходима гибкость рабочих операций и принятия решений.

**Рисунок. Классификация экзоскелетов****Figure. Classification of exoskeletons**

Основным преимуществом экзоскелетов перед роботизированными системами является совмещение творческих способностей и гибкости мышления человека с механическими возможностями технического устройства [8].

Экзоскелетом называется внешняя механическая несущая конструкция, которая прикрепляется к телу человека с помощью манжет [9]. На рисунке представлена существующая классификация экзоскелетов по областям применения и основным параметрам.

Экзоскелеты могут быть целыми или суставными (нижние или верхние конечности, корпус, предплечье, плечо, локоть и т. д.). Они также могут быть мягкими или жесткими, в зависимости от передачи усилия к человеку. Жесткие устройства включают в себя сплошную раму и жесткие структуры. Мягкие устройства более легкие, с мягким интерфейсом взаимодействия «human-device», включающим гибкий текстиль [9].

Разделение экзоскелетов на активные и пассивные предполагает, что активное устройство приводится в движение приводами, такими как электродвигатели, пневматические и гидравлические устройства, рычажные механизмы или другими типами приводов, например, искусственными мышцами. Пассивные вспомогательные устройства не включают в себя приводы. Для них характерно, что помимо перераспределения нагрузки естественные движения человека создают энергию, передающуюся на детали экзоскелета, пружины или демпферы, приводящие устройство в движение [9].

К проблематике медицины труда относится вопрос разработки промышленных экзоскелетов и обоснование медико-биологических требований к их применению. При промышленном применении экзоскелетов важна возможность ассистирования движений, когда инициатором движения является человек, а также их эффективность с точки зрения снижения уровня физической нагрузки на ОДА работника.

За последние несколько лет на мировом рынке появилось множество компаний, предлагающих свои решения в области экзоскелетов: разработки ведутся в США, Японии, Южной Корее, странах Европы, а также в России. Эффективность применения экзоскелетов исследовалась в различных отраслях промышленности, где деятельность работников связана с высокими динамическими или статическими нагрузками, в частности, на автомобильном производстве и в строительных компаниях.

Наиболее эффективными для разгрузки мышц верхней части тела работника являются промышленные экзоскеле-

ты, направленные на удержание тяжелого инструмента и поддержание рациональной рабочей позы. Для удержания инструмента используются экзоскелеты, сконструированные в виде подпружиненного плеча или механизированных перчаток (экзоперчатки). Экзоскелеты, поддерживающие правильную осанку, позволяют снизить нагрузку на мышцы спины и позвоночник при выполнении наклонов и подъемов.

Ниже рассмотрены основные особенности современных моделей активных и пассивных экзоскелетов верхних конечностей для их промышленного применения.

Пассивные экзоскелеты получили широкое распространение в промышленной сфере благодаря простоте конструкции. Современные модели экзоскелетов FLX Ergo-Skeleton (StrongArm Technologies, США) [10], ShoulderX (suitX, Великобритания) [11,12], Skelex (Skelex, Нидерланды) [13,14], Steadicam Fawcett Exovest (Tiffen, США) [15–17] Levitate Airframe (Levitate Technologies, США) [5,18] и др. направлены на ограничение движений, которые могут привести к травмам, компенсацию веса тяжелых предметов и снижению величины усилия, требуемого для удержания инструментов перед собой или над головой.

Стоит отметить, что биомеханические исследования эффективности применения отдельных моделей экзоскелетов [19] показывают не только снижение активности мышц при поднятии, опускании и перестановке груза, но и повышение активности мышц-антагонистов, нагрузки на сердечно-сосудистую систему и изменения в кинематике верхних конечностей, что указывает на несовершенство конструкций экзоскелетов и необходимость их оптимизации.

Активные промышленные экзоскелеты, такие как Muscle suit (Innophys, Япония) [20], Stuttgart Exo-Jacket (Future Work Lab, Германия) [21], являются перспективной отраслью разработки из-за большого числа рабочих, имеющих дело с постоянными поднятиями и переносами тяжелых предметов. Однако главным препятствием на пути распространения экзоскелетов данного типа является необходимость автономности конструкции для обеспечения свободного перемещения человека на предприятии, что значительно усложняет проектирование экзоскелета и приводит к увеличению его массы.

В последние годы разработка экзоскелетов является активно развивающейся тематикой. Однако современное состояние рассматриваемой области далеко от совершенства [21]. Актуально совершенствование существующих разра-

Таблица 1 / Table 1

Факторы интерфейса взаимодействия пользователя с экзоскелетом
Factors of the interface user interaction with the exoskeleton

Тип фактора	Область воздействия	Проблема
pHRI-факторы	Используются для определения пригодности экзоскелетов и определяются кинематическими критериями экзоскелетов	Ограничение движения в рабочем пространстве; требования к точной подстройке под операторов разной комплекции; ограничение на мобильность и дискомфорт при движении
cHRI-факторы	Используются для оценки взаимодействия пользователя с экзоскелетом с точки зрения интерфейса «человек-машина»	Создание интуитивно понятных систем управления; индивидуальная оптимизация параметров управления под конкретного оператора для лучшего взаимодействия с экзоскелетом

Таблица 2 / Table 2

Достоинства и недостатки типов экзоскелетов
Advantages and disadvantages of exoskeleton types

Тип экзоскелета	Достоинства	Недостатки
Пассивный	Легкая разработка; повышенная мобильность; не зависит от источников внешнего питания; небольшая масса конструкции; высокая надежность; низкая стоимость устройства и его обслуживания; учтен механизм формирования биологической обратной связи	Снижена способность уменьшения усилия для работы с тяжелыми предметами; невозможность использования при отсутствии остаточной силы мышц; невозможность программирования; относительно низкая скорость перемещения; индивидуальная необходимость в анатомической параметризации; движения с ограниченной амплитудой
Активный	Повышенная сила ассистирования; высокая скорость перемещения; значительное увеличение силы и амплитуды движений; регулируемость и возможность программирования позволяют выполнять большой объем работы	Тяжелый источник питания; отсутствие мобильности из-за проводов; зависимость от источников внешнего питания; массивность конструкции; зависимость от климатических условий; необходимость ремонта и обслуживания и привязанность к комплектующим; высокая стоимость

боток в части увеличения как pHRI-факторов («physical human robot interaction» — физическое взаимодействие человека с автоматическим манипулятором), так и cHRI-факторов («cognitive human robot interaction» — когнитивное взаимодействие человека с автоматическим манипулятором) носимых экзоскелетов, представленные в табл. 1. Данные направления исследований обусловлены отсутствием устоявшихся требований к конструкции, сложностью проектирования кинематики и сложностью реализации компактной и легкой конструкции экзоскелета [21].

Большинство доступных промышленных экзоскелетов, прошедших испытания на предприятиях, являются пассивными. Актуальной является разработка легких мобильных активных экзоскелетов, габариты которых оптимальны для рабочего пространства. На сегодняшний день не существует мобильных активных экзоскелетов верхних конечностей, удобных в использовании и обладающих достаточными по емкости аккумуляторами для обеспечения автономности работника. Сравнение активных и пассивных экзоскелетов см. в табл. 2.

Заключение. Физический труд высокой интенсивности остается ведущим фактором риска развития профессиональных заболеваний ОДА плечевого пояса в различных сферах экономики, где работник является неотъемлемой частью трудового процесса. Применение промышленных экзоскелетов верхних конечностей, разработанных для ассистирования производственных движений, представляется перспективным способом снижения тяжести труда путем оптимального перераспределения нагрузки на различные части тела работающего, что будет способствовать повышению его работоспособности и позволит снизить экономические затраты на случаи ВУТ и травматизма на производстве, лечение профессиональных заболеваний. По своим возможностям обеспечения защиты

работника от воздействия вредных производственных факторов, в частности физических перегрузок, промышленные экзоскелеты могут стать современным средством индивидуальной защиты, что требует дальнейшей разработки и внедрения стандартизированных критериев и методов оценки их безопасности и эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eurofound: Sixth European Working Conditions Survey — Overview report (2017 update), Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017. https://www.eurofound.europa.eu/sites/default/files/ef_publication/field_ef_document/ef1634.pdf.
2. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2017 г.: Государственный доклад. М.: Роспотребнадзор, 2018. http://rospotrebnadzor.ru/upload/iblock/d9d/gd_2017_seb.pdf
3. Томакова И.А., Томаков В.И. Состояние условий труда, профессиональные заболевания и производственный травматизм в экономике Российской Федерации. Известия юго-западного государственного университета. 2016; 2(19): 95–107.
4. Stadler K. S. Exoskeletons in industry: designs and their: AUTSYM 2017–8th International Symposium on Automatic Control. 2017, September; Wismar; 2017. DOI: 10.21256/zhaw-3495.
5. Kim S., Nussbaum M.A., Mokhlespour Esfahani M.I. et al. Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part I — «Expected» effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance. Appl. Ergon. 2018; 70: 315–22. DOI: 10.1016/j.apergo.2018.02.025.
6. Бухтияров И.В., Измеров Н.Ф., Тихонова Г.И. и др. Производственный травматизм как критерий профессионального риска. Проблемы прогнозирования. 2017; 5 (164): 140–9.

7. О результатах мониторинга условий и охраны труда в Российской Федерации в 2016 г.: Доклад Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации, 2017. http://www.trudcontrol.ru/files/editor/files/%D0%9C%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%BD%D0%B3_2016.pdf
 8. 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 workload. *Ergonomics*. 2016; 59(5): 671–81. DOI: 10.1080/00140139.2015.1081988.
 9. McGowan B. Industrial Exoskeletons: What You're Not Hearing. <https://ohsonline.com/articles/2018/10/01/industrial-exoskeletons-what-youre-not-hearing.aspx>
 10. ErgoSkeleton. StrongArm Technologies, Inc. <https://www.strongarmtech.com/ergoskeleton>
 11. Van Engelhoven L., Poon N., Kazerooni H., Barr A., Rempel D., Harris-Adamson C. Evaluation of an adjustable support shoulder exoskeleton on static and dynamic overhead tasks. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 2018; 62(1): 804–8. DOI: 10.1177/1541931218621184
 12. Shoulder X: Dynamic Shoulder Support. SuitX Industrial Products. <https://www.suitx.com/shoulderx>
 13. SkelEx. <http://skel-ex.com/#>
 14. SkelEx Launches SkelEx V1. VenturesOne. <http://venturesone.com/skel-ex-has-launched-the-first-official-version-of-the-skel-ex-exoskeleton-the-skel-ex-v1/>
 15. Weston E.B., Alizadeh M., Knapik G.G. et al. Biomechanical evaluation of exoskeleton use on loading of the lumbar spine. *Appl. Ergon.* 2018; 68: 101–8. DOI:10.1016/j.apergo.2017.11.006.
 16. Fawcett C., Hayball L. Vest: Steadicam Fawcett Exovest. The Tiffen Company. <https://www.afcs.fr/IMG/pdf/lit-815780.pdf>
 17. Fawcett C. Steadicam Posture. Available at: <http://steadivision.com/media/steadipos3.pdf>
 18. Wesslén J. Exoskeleton exploration: Research, development, and applicability of industrial exoskeletons in the automotive industry. 2018. <http://hj.diva-portal.org/smash/get/diva2:1216221/FULLTEXT01.pdf>
 19. Theurel J., Desbrosses K. et al. Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Appl. Ergon.* 2018; 67: 211–7. DOI: 10.1016/j.apergo.2017.10.008.
 20. Muscle Suit, a compact and lightweight wearable exoskeleton device that supports the lower back muscular system by providing up to 35.7 kg of extra power. Innophys Co., Ltd. <http://resourcecenter.venturevaluation.com/wp-content/uploads/2018/03/Innophys.pdf>
 21. Ebrahimi A. Stuttgart Exo-Jacket: An exoskeleton for industrial upper body applications. 2017 10th International Conference on Human System Interactions (HSI), Ulsan, 2017; 258–63. DOI: 10.1109/HSI. 2017.8005042.
- REFERENCES
1. Eurofound: Sixth European Working Conditions Survey — Overview report (2017 update), Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017. Available at: https://www.eurofound.europa.eu/sites/default/files/ef_publication/field_ef_document/ef1634en.pdf
 2. On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation in 2017: State report. Federal'naya sluzhba po nadzoru v sfere zashchity prav potrebitel'ey i blagopoluchiya cheloveka, Moscow 2018. http://rospotrebnadzor.ru/upload/iblock/d9d/gd_2017_seb.pdf (in Russian).
 3. Tomakova I.A., Tomakov V.I., The state of working conditions, occupational diseases, industrial injuries at enterprises of the Russian Federation and the tasks that must be solved. *Izvestiya yugo-zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016; 2 (19): 95–107 (in Russian).
 4. Stadler K.S. Exoskeletons in industry: designs and their: AUTSYM 2017–8th International Symposium on Automatic Control. 2017, September; Wismar; 2017 DOI 10.21256/zhaw-3495.
 5. Kim S., Nussbaum M.A., Mokhlespour Esfahani M.I. et al. Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part I — «Expected» effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance. *Appl. Ergon.* 2018; 70: 315–22. DOI 10.1016/j.apergo.2018.02.025.
 6. Bukhtiyarov I.V., Izmerov N.F., Tikhonova G.I., Churanova A.N. Industrial injuries as a criterion for occupational risk. *Problemy prognozirovaniya*. 2017; 5 (164): 140–9 (in Russian).
 7. On the results of monitoring the conditions and labor protection in the Russian Federation in 2016: Report of the Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation, 2017. http://www.trudcontrol.ru/files/editor/files/%D0%9C%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%BD%D0%B3_2016.pdf (in Russian).
 8. 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 workload. *Ergonomics*. 2016; 59(5): 671–81. DOI: 10.1080/00140139.2015.1081988.
 9. McGowan B. Industrial Exoskeletons: What You're Not Hearing. <https://ohsonline.com/articles/2018/10/01/industrial-exoskeletons-what-youre-not-hearing.aspx>
 10. ErgoSkeleton. StrongArm Technologies, Inc. <https://www.strongarmtech.com/ergoskeleton>
 11. Van Engelhoven L., Poon N., Kazerooni H., Barr A., Rempel D., Harris-Adamson C. Evaluation of an adjustable support shoulder exoskeleton on static and dynamic overhead tasks. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 2018; 62(1): 804–8. DOI: 10.1177/1541931218621184
 12. Shoulder X: Dynamic Shoulder Support. SuitX Industrial Products. Available at: <https://www.suitx.com/shoulderx>
 13. SkelEx. <http://skel-ex.com/#>
 14. SkelEx Launches SkelEx V1. VenturesOne. <http://venturesone.com/skel-ex-has-launched-the-first-official-version-of-the-skel-ex-exoskeleton-the-skel-ex-v1/>
 15. Weston E.B., Alizadeh M., Knapik G.G. et al. Biomechanical evaluation of exoskeleton use on loading of the lumbar spine. *Appl. Ergon.* 2018; 68: 101–8. DOI:10.1016/j.apergo.2017.11.006.
 16. Fawcett C., Hayball L. Vest: Steadicam Fawcett Exovest. The Tiffen Company. <https://www.afcs.fr/IMG/pdf/lit-815780.pdf>
 17. Fawcett C. Steadicam Posture. <http://steadivision.com/media/steadipos3.pdf>
 18. Wesslén J. Exoskeleton exploration: Research, development, and applicability of industrial exoskeletons in the automotive industry. 2018. <http://hj.diva-portal.org/smash/get/diva2:1216221/FULLTEXT01.pdf>
 19. Theurel J., Desbrosses K. et al. Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Appl. Ergon.* 2018; 67: 211–7. DOI:10.1016/j.apergo.2017.10.008.
 20. Muscle Suit, a compact and lightweight wearable exoskeleton device that supports the lower back muscular system by providing up to 35.7 kg of extra power. Innophys Co., Ltd. <http://resourcecenter.venturevaluation.com/wp-content/uploads/2018/03/Innophys.pdf>
 21. Ebrahimi A. Stuttgart Exo-Jacket: An exoskeleton for industrial upper body applications. 2017 10th International Conference on Human System Interactions (HSI), Ulsan, 2017; 258–63. DOI: 10.1109/HSI. 2017.8005042.

Дата поступления / Received: 24.04.2019

Дата принятия к печати / Accepted: 20.05.2019

Дата публикации / Published: 24.07.2019