

На правах рукописи



ГЕРЕГЕЙ Андрей Михайлович

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ
ФИЗИОЛОГО-ЭРГНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭКЗОСКЕЛЕТОВ**

14.02.04 – медицина труда

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Москва – 2020 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова»

Научный руководитель: **Глухов Дмитрий Валерьевич**

доктор медицинских наук

Научный консультант: **Моисеев Юрий Борисович**

доктор медицинских наук, профессор

Официальные оппоненты: **Ганапольский Вячеслав Павлович**

доктор медицинских наук, доцент / начальник научно-исследовательского отдела (обитаемости) научно-исследовательского центра ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова» МО РФ

Лахман Олег Леонидович

доктор медицинских наук, профессор, профессор РАН / директор ФГБНУ «Восточно-сибирский институт медико-экологических исследований»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем» Российской академии наук

Защита состоится 21 декабря 2020 г. в 10:00 часов на заседании Диссертационного совета Д 001.012.01 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова» по адресу: 105275, г. Москва, проспект Буденного, д.31

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБНУ «НИИ МТ», а также на официальном сайте ФГБНУ «НИИ МТ» – <http://www.irioh.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор биологических наук, профессор

Нина Борисовна Рубцова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Несмотря на значительный рост автоматизации и механизации производств, наиболее значимые вредные производственные факторы остаются связаны с тяжестью трудового процесса. По данным Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека профессиональная заболеваемость, связанная с воздействием физических перегрузок и перенапряжением отдельных органов и систем, в 2019 году заняла, по-прежнему, второе ранговое место в структуре профессиональной патологии в зависимости от воздействующего вредного производственного фактора и составила 22,7%. Радикулопатии различной локализации составляли 58,7% от общего числа заболеваний в группе, нейропатии – 20,3%, периартрозы и деформирующие остеоартрозы – 10,2%, прочие заболевания в группе – 10,8% (Роспотребнадзор, 2020 г.).

В случаях, когда безопасность работ не может быть обеспечена конструкцией оборудования, организацией производственного процесса, внедрением механизации и автоматизации отдельных технологических операций, системой организации безопасности проведения работ предусмотрено применение средств индивидуальной защиты (СИЗ) (ТК РФ, 2001). В настоящее время для защиты от большинства вредных и (или) опасных факторов производственной среды (физических, химических, биологических) определены СИЗ различных классов (ТР ТС 019/2011, 2011). Однако для снижения воздействия тяжести трудового процесса, как неблагоприятного фактора, в силу его специфики на сегодняшний день СИЗ не разработано.

Одним из принципов, заложенных в концепцию надвигающейся четвертой промышленной революции, характеризующейся слиянием технологий и размытием граней между физическими, цифровыми и биологическими мирами, является техническая помощь машин человеку для выполнения ряда небезопасных для человека задач (Тарасов И.В., 2018). Актуальным и перспективным направлением является развитие технологий применения промышленных экзоскелетов (ПЭ) – носимых устройств (как правило, антропоморфной конструкции), предназначенных для усиления естественных возможностей, уменьшения воздействия физической нагрузки на работника путем защиты его опорно-двигательного аппарата (ОДА) за счет внешнего

каркаса. Экзоскелеты, как правило, повторяют биомеханику человека для пропорционального увеличения усилий при движениях, повышают защищенность работника от воздействия физических нагрузок, способствуя уменьшению профессиональных рисков заболеваний и травм ОДА. Механизированные перчатки, помогающие в манипулировании тяжелыми ручными инструментами, специальные стулья, облегчающие труд работника при преодолении нагрузок, связанных со статической работой мышц, экзоскелеты, предназначенные для разгрузки плечевого пояса, снижения нагрузки с позвоночника и мышц спины, полноразмерные экзокостюмы и роботизированные экзоскелетные модули в настоящее время уже нашли применение в различных отраслях промышленности (Exoskeleton Report LLC, 2020), а прогнозы крупнейших аналитических компаний указывают на многократный рост их рынка в ближайшие годы (Лаборатория робототехники Сбербанка, 2018).

Мировой рынок экзоскелетных технологий стремительно растет, и сегодня более 80 компаний по всему миру применяют ПЭ, представленные более, чем 60 разработчиками (Lowe B.D. et al., 2019). Проекты, связанные с разработкой ПЭ, успешно продвигаются и на технологических площадках российских производителей (Колерова В., 2018; Robogeek, 2019; Tadviser, 2019; Аникиенко Е., 2019). Важно отметить, что терминология в этом направлении, развивается также быстро, как и технологии (Lowe B.D. et al., 2019).

Учитывая тот факт, что ПЭ используются работником для предотвращения или уменьшения воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов, можно утверждать, что они в соответствии с разрабатываемыми стандартами системы безопасности труда смогут представить перспективный тип СИЗ, действие которых направлено на облегчение физического труда. Активные обсуждения данной проблемы состоялись в рамках мероприятий деловых программ «Безопасность и охрана труда» («БИОТ-2018»), «Всероссийской недели охраны труда» («ВНОТ-2019»), заседаний Технического комитета «Средства индивидуальной защиты» («ТК 320») ФГУП «Стандартинформ», на которых подчеркивалась необходимость объединения усилий профессионального сообщества и предпринимателей в области внедрения

передовых технологий, в частности ПЭ, направленных на оптимизацию условий труда и сохранение здоровья работников.

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 структуру технического комитета (ТК 320) внесен подкомитет «Промышленные экзоскелеты» (ПК 11), организованный на базе ФГБНУ «НИИ МТ».

Существующие медико-биологические подходы к физиолого-эргономической оценке современных образцов ПЭ и СИЗ не могут в полном объеме удовлетворить требования к исследованиям безопасности и физиологической эффективности их применения, так как морально устарели и не учитывают возможности применения современного оборудования. Это обосновывает необходимость разработки и внедрения стандартизированных методов и критериев оценки безопасности и эффективности применения ПЭ (Орлов И.А. и др., 2019).

Степень разработанности темы исследования. На сегодняшний день вопросы, связанные с испытаниями ПЭ, актуальны для специалистов компаний-разработчиков во всем мире. Как правило, значительная доля исследований в этой области направлена на непосредственное внедрение экзоскелетных технологий в производственные процессы в натуральных условиях. Исследование безопасности и эффективности их применения заключается в анализе субъективных ощущений и мнений работников и оценке производительности труда. При этом в последние годы заметно увеличилось количество научных публикаций, в основном зарубежных исследователей, где разработчики оценивают физиологическую эффективность и безопасность применения ПЭ путем субъективных (опросы, анкетирования) и объективных методов исследования. В качестве последних применяют, как правило, методы оценки динамики показателей кардиореспираторной системы (КРС) и ОДА человека (М.Г. Мощенко и др., 2019; S. Kim, et al., 2018; K. Huysamen et al., 2018; M. de Looze, et al., 2018; T. Schmalz, et al., 2019; A.S. Koopman, et al., 2019, J. Bornmann et al., 2019).

В настоящее время ведется работа по стандартизации в терминологии, тактико-технических требованиях, подходах к оценке безопасности и

физиологической эффективности применения ПЭ, а также формированию нормативных баз по данному направлению. В настоящее время в рамках Программы национальной стандартизации на 2019 год (ПНС-2019) ведутся работы по пересмотру ГОСТ 12.4.011-89 «Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация» (Приказ Росстандарта от 01.11.2018 N 2285), при этом рассматривается вопрос включения в классификацию нового типа СИЗ ОДА, относящихся к группе защиты от тяжести труда.

Проведение испытаний, связанных с определением показателей защитных характеристик СИЗ, являются, в большей мере, прерогативой исследователей технических специальностей. Проблемы оценки эффективности защиты различных видов СИЗ от неблагоприятного воздействия физических, химических и биологических факторов подробно проработаны специалистами в области безопасности труда как в методическом, так и критериальном смысле (ГОСТ EN 340 – 2012, ГОСТ 12.4.265 – 2014, ГОСТ 12.4.023 – 84, ГОСТ 12.4.061 – 88). В отличие от этого, вопросам, связанным с физиолого-эргономическими исследованиями СИЗ работников физического труда, уделено гораздо меньше внимания. Существенной проблемой является то, что оценка функционального состояния (ФС) организма работника, применяющего СИЗ, основана на применении малоинформативных инструментальных методов, а зачастую связана с интерпретацией лишь субъективных ощущений испытуемых (ГОСТ 12.4.061 – 88). На сегодняшний день медико-биологическая оценка образцов СИЗ осуществляется, в основном, с применением субъективных методов исследования, а существующие объективные методы базируются на регистрации ограниченного набора физиологических показателей.

Цель исследования: обосновать комплекс методов объективной физиолого-эргономической оценки экспериментальных образцов промышленных экзоскелетов в лабораторных условиях.

Задачи исследования:

1. Экспериментально оценить возможность применения эргоспирометрии и метода «захвата движений» для физиолого-эргономической оценки моделей средств индивидуальной защиты, отягчающих физическую нагрузку на работников.

2. Разработать лабораторные модели трудовой деятельности работников физического труда для физиолого-эргономической оценки экспериментальных образцов промышленных экзоскелетов.

3. Исследовать динамику показателей кардиореспираторной системы и опорно-двигательного аппарата работников физического труда при лабораторном моделировании использования экспериментальных образцов промышленных экзоскелетов.

4. Разработать алгоритм физиолого-эргономической оценки промышленных экзоскелетов, позволяющий повысить надежность и объективность проведения медико-биологических испытаний ПЭ.

Научная новизна исследования. Впервые разработан комплекс объективных методов оценки энерготрат, биомеханических характеристик движений человека, биоэлектрической активности и тонуса мышц, позволяющих проводить физиолого-эргономическую оценку промышленных экзоскелетов, как перспективных средств индивидуальной защиты опорно-двигательного аппарата, который реализован в виде алгоритма.

Впервые на основании результатов исследований тяжести трудового процесса, рабочих поз и движений разработаны модели трудовой деятельности работников физического труда с целью физиолого-эргономической оценки промышленных экзоскелетов в лабораторных условиях, имеющие соответствие натурным (производственным) условиям по фактору тяжести трудового процесса.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в комплексном изучении соотношений различных физиологических показателей КРС и ОДА человека при моделировании профессиональной деятельности с использованием образцов СИЗ и экспериментальных образцов (ЭО) ПЭ для формирования алгоритма их физиолого-эргономической оценки.

Результаты диссертационного исследования используются для оценки физиолого-эргономических характеристик при модернизации существующих и разработки новых образцов ПЭ. Объективная физиолого-эргономическая оценка ПЭ на основании разработанной методологии повысит надежность и объективность исследований, что окажет положительное влияние на качество

проведения их испытаний на этапах разработки, создания и опытной эксплуатации. Результаты работы послужат основой для разрабатываемых в рамках Программы национальной стандартизации на 2020 г. ГОСТ, в том числе: «Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты опорно-двигательного аппарата. Промышленные экзоскелеты. Общие технические условия» и «Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты опорно-двигательного аппарата. Промышленные экзоскелеты. Методы определения степени защиты» (Приказ Росстандарта от 01.11.2019 N 2612). В рамках выполнения диссертационной работы получены два патента на изобретение (RU 2671187 C1, RU 2675126 C1) и один – на полезную модель (RU 171718 U1).

Методология и методы исследования. Методологическую основу работы составляли теоретические и эмпирические методы исследований. Основным теоретическим методом исследований являлся анализ. В качестве эмпирических методов исследования применяли непосредственное открытое наблюдение, сравнение, естественный и лабораторный измерительные эксперименты; применяли физиологические методы тестирования, в том числе эргоспирометрию, биомеханический анализ («захват движений») человека, электромиографию (ЭМГ), миотонометрию. Помимо этого, использовали специальные методы исследований, такие как моделирование, анкетирование и интервьюирование. При анализе результатов исследования использовали общепринятые методы статистической обработки с применением современного программного обеспечения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты оценки показателей тяжести трудового процесса, биомеханических характеристик рабочих поз и движений работников позволяют разработать адекватную лабораторную модель их трудовой деятельности.

2. Сформированный комплекс методов, включающий эргоспирометрию, биомеханический «захват движений», электромиографию и миотонометрию, позволяет объективно оценить физиологическую стоимость деятельности, степень ограничения движений в крупных суставах и сочленениях и нагрузку на опорно-двигательный аппарат работника физического труда при использовании

средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов в условиях лабораторной модели трудовой деятельности.

3. Разработанный алгоритм, основанный на оценке показателей тяжести трудового процесса, биомеханических характеристик рабочих поз и движений работников и применении медико-биологических методов в условиях лабораторной модели трудовой деятельности, позволяет осуществлять физиолого-эргономическую оценку промышленных экзоскелетов.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается достаточным количеством (более 600) измерений с использованием современных методов, с помощью которых выполнялись задачи и достигалась цель работы. Научные положения, выносимые на защиту, и выводы подкреплены объективными данными, наглядно представленными в приведенных таблицах и на рисунках. Подготовка, статистический анализ и интерпретация полученных результатов проведены с использованием современных методов обработки информации и статистического анализа.

Основные положения диссертации были обсуждены на Юбилейной Всеармейской научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития технических средств медицинской службы» (Санкт-Петербург, 2015), XX Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности» (Санкт-Петербург, 2017), Всероссийской научно-практической конференции «Технологические инновации в травматологии, ортопедии и нейрохирургии: интеграция науки и практики» (Саратов, 2018), симпозиуме «Всероссийской недели охраны труда-2019» (Сочи, 2019), панельных дискуссиях международного Форума «Skolkovo Robotics-2019» (Москва, 2019), международном форуме «Армия-2019» (Москва, 2019), Конгрессе «Профессия и здоровье-2019» (Самара, 2019), постерной сессии международной выставки «Ehoberlin-2019» (Германия, Берлин 2019), III Международном симпозиуме «EhoRehab-2019» (Москва, 2019), X Всероссийской научно-практической интернет-конференции с международным участием «Анализ риска здоровью – 2020» (Пермь, 2020), 3-м Международном молодежном форуме «Профессия и здоровье» (Суздаль, 2020).

Диссертационная работа апробирована на заседании отдела по изучению гигиенических проблем в медицине труда ФГБНУ «НИИ МТ».

Личный вклад автора. Личный вклад автора осуществлялся на всех этапах работы и состоял в планировании экспериментов, их организации и непосредственном выполнении, обработке полученных результатов, обсуждении результатов, написании статей и тезисов и всех разделов работы. Участие автора в выполнении, сборе и анализе – 90%, статистической обработке – 90%, в написании статей и тезисов – 90%, написании диссертации и автореферата – 100%.

Публикации. Материалы исследования опубликованы в 8 научных изданиях, в том числе в 6 статьях, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных изданий ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ. Разработаны два патента на изобретение и один – на полезную модель.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация изложена на 161 странице машинописного текста и состоит из введения, 4 глав, заключения, выводов, практических рекомендаций, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы; включает 25 таблиц, 50 рисунков; список литературы содержит 199 источников, из которых 75 отечественных, 124 иностранных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В I главе раскрыты современные подходы к физиолого-эргономической оценке СИЗ и ПЭ, обоснованы возможность применения эргоспирометрии, биомеханического «захвата движений», ЭМГ и мионометрии для оценки состояния КРС и ОДА, определены доступные и приемлемые средства измерений, использование которых послужило основой для разработанных методик, представленных во II главе.

Во II главе представлены организация, материалы и методы исследования. Исследование выполнено в ФГБНУ «НИИ МТ» в два этапа. На первом этапе были обоснованы наиболее адекватные решаемым задачам современные методы и средства, позволяющие оценить показатели состояния КРС и ОДА человека в процессе физической работы. Разработаны модель физической работы и методики оценки состояния КРС и ОДА добровольцев, часть из них

апробирована как в лабораторных, так и полевых условиях применительно к физиолого-эргономической оценке моделей СИЗ (мСИЗ), отягчающих физические нагрузки. На втором этапе был разработан и апробирован комплекс методик физиолого-эргономической оценки двух ЭО ПЭ. В качестве добровольцев привлекались 22 практически здоровых мужчины, не имеющих медицинских противопоказаний.

На 1 этапе работы использовали комплекты экипировки – мСИЗ в трех модификациях: мСИЗ-0, мСИЗ-1 и мСИЗ-2 как модели, не оказывающие существенного влияния, оказывающие незначительное и значительное (соответственно) негативное влияние на ФС человека в процессе выполнения физической работы. Моделирование физической работы на 1 этапе проводили путем предъявления высокоинтенсивных нагрузок, связанных с динамической работой мышц (совершение марш-броска на 5 км). На 2 этапе работы в качестве ЭО ПЭ использовали: «Exochair», массой 6 кг, предназначенный для уменьшения негативного влияния статических нагрузок на ОДА работников физического труда, в частности, при поддержании рабочей позы «стоя»; «ExoAtlant», массой 6 кг, предназначенный для уменьшения негативного влияния динамических нагрузок, связанных с подъемом тяжестей и наклонами корпуса, на ОДА работников физического труда. В начале 2 этапа с целью формирования лабораторной модели трудовой деятельности (ЛМТД) работников физического труда был осуществлен выезд на производственные площадки, где были определены тип работы, профессии и производственные операции специалистов – потенциальных потребителей ПЭ.

Для исследования безопасности и физиологической эффективности применения ЭО ПЭ «Exochair» и «ExoAtlant» моделировали трудовую деятельность логиста архивно-логистического центра и грузчика логистического центра соответственно. Дизайн исследования был сформирован таким образом, что каждый из добровольцев осуществлял моделирование трудовой деятельности (МТД) как без применения ПЭ (I группа), так и с его применением (II группа).

Медико-биологические методы оценки состояния КРС и ОДА человека включали в себя оценку общего состояния добровольцев, биомеханический «захват движений», эргоспирометрию, ЭМГ, миотонометрию. Оценку

показателей состояния КРС и ОДА осуществляли до начала (фоновые тестирования), в перерывах (промежуточные тестирования) и по окончании МТД (контрольные тестирования) (рисунки 1, 2).

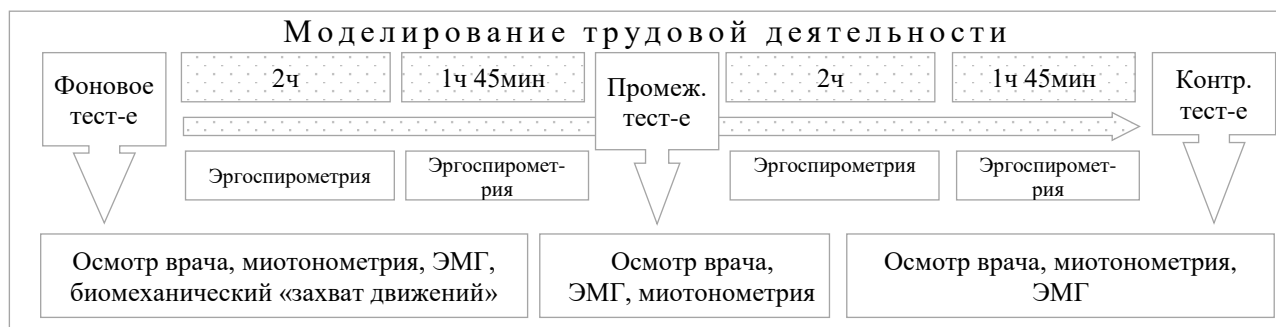


Рисунок 1 – Дизайн исследования для МТД логиста архивно-логистического центра (исследование ПЭ «Ехочаир»)



Рисунок 2 – Дизайн исследования для МТД грузчика логистического отдела (исследование ПЭ «ЕхоAtlant»)

В III главе представлены результаты исследований, в IV – материалы, касающиеся их анализа и обобщения.

Результаты оценки тяжести трудового процесса, исследования рабочих поз и движений на рабочих местах позволили установить классы логиста архивно-логистического центра (3 класс 2 степени вредности) и грузчика логистического центра (3 класс 2 степени вредности). Ключевыми параметрами, определяющими тяжесть труда логиста архивно-логистического центра, являются рабочая поза (стоя 80% за смену) и наклоны корпуса (200 за смену), грузчика логистического центра – масса поднимаемого и перемещаемого груза вручную (31 кг постоянно в течение смены, 538,6 кг с пола) и наклоны корпуса (280 за смену). Методом фотогониометрии сформированы эпюры рабочих поз специалистов. Результаты оценки тяжести трудового процесса, исследования рабочих поз и движений легли в основу разработки ЛМТД работников физического труда. С использованием архивных коробов, папок, мультифор, палет, разборных гантелей и стола-трансформера разработаны ЛМТД работников, идентичные натурным условиям по фактору тяжести трудового процесса.

Результаты исследования динамики состояния КРС с применением метода эргоспирометрии позволили получить ряд аргументов, подтверждающих влияние мСИЗ и ПЭ на физиологическую стоимость выполнения работы добровольцами.

На фоне увеличения времени выполнения работы с использованием мСИЗ-1 и мСИЗ-2 выявлено уменьшение показателя легочной вентиляции (ЛВ) при использовании мСИЗ-2. Помимо этого, зарегистрировано увеличение частоты дыхательных движений (ЧДД) во время нагрузки при работе с использованием мСИЗ-1 и мСИЗ-2 (на 6,8% и 5,2% соответственно). Энерготраты добровольцев при использовании мСИЗ-1 превышали аналогичные показатели, регистрируемые при выполнении работы в мСИЗ-0, на 14,0%, а энерготраты добровольцев, работающих в мСИЗ-2, превышали значения аналогичных показателей при использовании мСИЗ-0 и мСИЗ-1 в среднем на 33,3% и 16,9% соответственно (таблица 1).

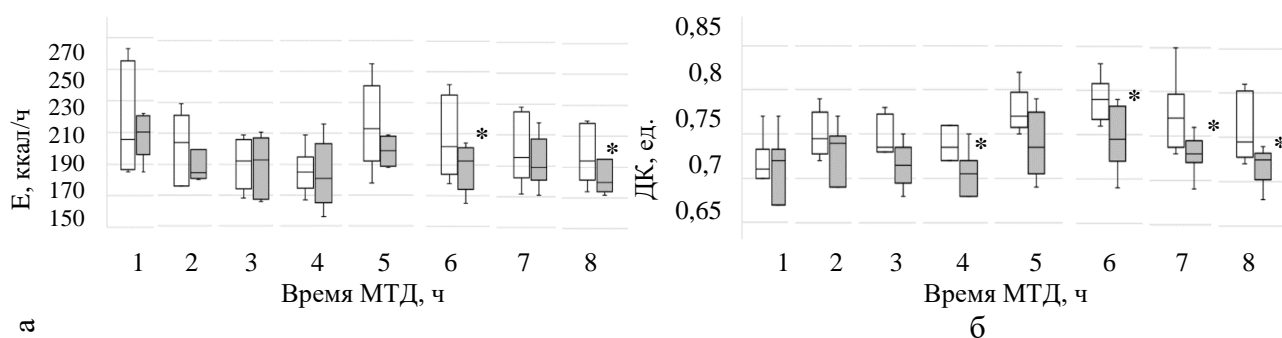
Таблица 1 – Показатели состояния КРС добровольцев, регистрируемые при выполнении физической работы, n=12

Показатель, единицы измерения	Значения показателей при использовании различных мСИЗ, М±s		
	мСИЗ-0	мСИЗ-1	мСИЗ-2
Время выполнения работы (t), мин	24,7±1,9	27,8±2,2*	40,4±2,8*#
ЧДД за период нагрузки, мин. ⁻¹	45,9±6,3	49,0±5,1*	48,3±7,6*
ЛВ за период нагрузки, л/мин	120±21	124±20	104±20*#
ЧСС за период нагрузки, мин ⁻¹	160±11	157±11	155±9
Энерготраты за период нагрузки, ккал	423±67	483±82*	564±104*#

Примечание:* – статистически значимые различия по сравнению со значениями аналогичных показателей, зарегистрированных у добровольцев, использующих мСИЗ-0 (p≤0,05); # – статистически значимые различия по сравнению со значениями аналогичных показателей, зарегистрированных у добровольцев, использующих мСИЗ-1 (p≤0,05)

При физиолого-эргономической оценке ЭО ПЭ «Exochair» на всем протяжении МТД на фоне увеличения производительности труда (на 13% – 37%) выявлена тенденция к снижению частоты сердечных сокращений (ЧСС), дыхательного коэффициента (ДК) и энерготрат добровольцев. Снижение показателя ЧСС (на 11%) на протяжении 3-го часа МТД, ДК (на 3 – 5%) на протяжении 4-го и трех последних часов, энерготрат (на 5 и 7%) на протяжении 6-го и 8-го часов у добровольцев, выполняющих работу с использованием ЭО ПЭ «Exochair», являются статистически значимыми по сравнению со значениями, зарегистрированными у добровольцев, не использующих ЭО ПЭ (рисунок 3). Данные изменения свидетельствуют о снижении нагрузки на КРС,

что, вероятно, связано с уменьшением интенсивности процессов энергообеспечения мышечной деятельности.



а

б

□ – без использования ЭО ПЭ «Exochair»; ■ – с использованием ЭО ПЭ «Exochair»

Рисунок 3 – Динамика показателей ЧСС (а) и энергозатрат (б) добровольцев в различные периоды МТД, n=6

Примечание: * – статистически значимые различия по сравнению со значениями аналогичных показателей, зарегистрированных у добровольцев, не использующих ЭО ПЭ «Exochair» ($p \leq 0,05$)

При использовании ЭО ПЭ «ExoAtlant» наблюдается отсутствие статистически значимой динамики показателей состояния КРС, что может быть обусловлено небольшой выборкой и индивидуальными особенностями реакции КРС добровольцев на физическую нагрузку. В большинстве случаев все показатели КРС у добровольцев при МТД находятся в пределах референсных значений и соответствуют интенсивности нагрузки.

Исследование биомеханических характеристик движений добровольцев с использованием биомеханического «захвата движений» позволило экспериментально установить, что массогабаритные характеристики и конструктивные особенности мСИЗ и ЭО ПЭ в большинстве случаев ограничивают МААД в крупных суставах конечностей и сочленениях позвоночника добровольцев (таблицы 2, 3).

Установлено, что конструктивные особенности мСИЗ-1 ограничивают максимальные амплитуды активных движений (МААД) в суставах верхних конечностей: при сгибании в левом плечевом суставе (ЛПС) и правом плечевом суставе (ППС) на 19,3% и 27,3% соответственно; разгибании в ЛПС и ППС на 36,2% и 32,1% соответственно; при сгибании в правом локтевом суставе (ПЛС) на 5,0% (таблица 2).

Конструктивные особенности мСИЗ-2 вызывают существенное ограничение МААД в ЛПС и ППС: при вертикальном отведении в ЛПС и ППС на 22,5% и 17,2% соответственно по сравнению с аналогичными показателями

при использовании мСИЗ-0, на 15,6% и 12,8% соответственно по сравнению с аналогичными показателями при использовании мСИЗ-1; сгибании в ЛПС и ППС на 28,7% и 30,0% соответственно по сравнению с аналогичными показателями при использовании мСИЗ-0, на 11,6% и 2,3% соответственно по сравнению с аналогичными показателями при использовании мСИЗ-1; разгибании в ЛПС и ППС на 41,4% и 37,7% соответственно по сравнению с аналогичными показателями при использовании мСИЗ-0; сгибании в ППС на 6,5% по сравнению с аналогичными показателями при использовании мСИЗ-0.

Таблица 2 – Показатели МААД в крупных суставах конечностей и сочленениях позвоночника добровольцев при использовании различных мСИЗ, n=12

Вид движения	Сустав, область	Амплитуда движения, град., Ме [25; 75]		
		мСИЗ-0	мСИЗ-1	мСИЗ-2
Отведение	ЛПС	160 [148;165]	147 [138;162]	124 [117;141]*#
	ППС	157 [143;167]	149 [140;164]	130 [120;138]*#
Сгибание	ЛПС	171 [149;178]	138 [106;143]*	122 [117;129]*#
	ППС	176 [156;178]	128 [108;139]*	125 [122;127]*#
Разгибание	ЛПС	58 [43;63]	37 [35;42]*	34 [27;36]*
	ППС	53 [43;59]	36 [26;40]*	33 [30;38]*
Сгибание	ППС	139[131;142]	132[115;136]*	130 [115;136]*
	ЛПС	86 [78;94]	84 [75;90]	70 [53;78]*#
Отведение	ЛПС	31 [23;34]	30 [17;35]	22 [11;31]*#
Сгибание	ЛПС	123[110;139]	119 [112;130]	113[110;116]*#
Сгибание (присед)	ЛПС	66 [58;70]	58 [50;68]	48 [43;56]*#
Сгибание	позвоночник (шейный отд.)	36 [34; 46]	37 [32;40]	32 [30; 35]*
Разгибание		61 [53;70]	55 [51;68]	50 [46; 55]*
Сгибание	позвоночник (поясн. отд.)	64 [50;69]	59 [55;66]	54 [47;56]*#
Разгибание		21 [18;30]	20 [16;29]	17 [14;25]*#
Латерофлексия (вправо)		20 [16;24]	19 [15;22]	16 [13;18]*#
Латерофлексия (влево)		19 [16;28]	18 [15;26]	15[13;22]*#

Примечание:* – статистически значимые различия по сравнению со значениями аналогичных показателей, зарегистрированных у добровольцев, использующих мСИЗ-0 ($p \leq 0,05$); # – статистически значимые различия по сравнению со значениями аналогичных показателей, зарегистрированных у добровольцев, использующих мСИЗ-1 ($p \leq 0,05$)

Кроме того, конструктивные особенности элементов мСИЗ-2 ограничивали МААД в суставах нижних конечностей: при сгибании в левом тазобедренном суставе (ЛПС) на 18,6% по сравнению с аналогичными показателями при использовании мСИЗ-0 и на 16,7% – при использовании мСИЗ-1; отведении в ЛПС на 29,0% по сравнению с аналогичными показателями при использовании мСИЗ-0 и на 26,7% – при использовании мСИЗ-1; сгибании в левом коленном суставе (ЛПС) на 8,1% по сравнению с аналогичными показателями при использовании мСИЗ-0 и на 5,0% – при использовании мСИЗ-

1; сгибании в ЛКС (при выполнении глубокого приседания) на 27,2% по сравнению с аналогичными показателями при использовании мСИЗ-0 и на 17,2% – при использовании мСИЗ-1.

Помимо этого, конструктивные особенности элементов мСИЗ-2 ограничивают МААД в сочленениях позвоночника: при сгибании и разгибании в шейном отделе на 11,1% и 18,0% соответственно по сравнению с аналогичными показателями при использовании мСИЗ-0; сгибании в поясничном отделе на 15,6% по сравнению с аналогичными показателями при использовании мСИЗ-0 и на 8,5% – при использовании мСИЗ-1; разгибании в поясничном отделе на 19,0% по сравнению с аналогичными показателями при использовании мСИЗ-0 и на 15,0% – при использовании мСИЗ-1; латерофлексии вправо в поясничном отделе на 20,0% по сравнению с аналогичными показателями при использовании мСИЗ-0 и на 15,8% – при использовании мСИЗ-1; латерофлексии влево в поясничном отделе на 25,0% по сравнению с аналогичными показателями при использовании мСИЗ-0 и на 16,7% – при использовании мСИЗ-1.

Установлено, что конструктивные особенности ЭО ПЭ «Exochair» в большинстве случаев не ограничивают МААД в крупных суставах верхних конечностей, либо ограничивают их несущественно (таблица 3).

При этом наблюдается ряд существенных уменьшений значений МААД у добровольцев II группы по сравнению с аналогичными показателями I группы при сгибании в ЛТС и правом тазобедренном суставе (ПТС) на 3,3% и 11,8% соответственно; сгибании в ЛТС и ПТС на 67,1% и 64,3% соответственно, сгибании в ЛКС и правом коленном суставе (ПКС) на 54,0% и 57,0% соответственно при выполнении глубокого приседания; сгибании в ЛКС и ПКС на 47,0% и 52,5% соответственно при выполнении «захлеста голени»; сгибании в ЛТС и ПТС на 26,7% и 28,4% соответственно, а также в ЛКС и ПКС на 33,6% и 40,9% соответственно при подъеме ноги, согнутой в КС (таблица 3). Помимо этого, установлены статистически значимые уменьшения значений МААД в пояснично-грудном отделе позвоночника у добровольцев II группы по сравнению с аналогичными показателями I группы при сгибании в сагиттальной плоскости на 37,7%; сгибании во фронтальной плоскости вправо и влево на 5,9% и 9,1%

соответственно; ротации вправо и влево на 38,5% и 46,4% соответственно; при выполнении приседаний на 61,9% в сагиттальной плоскости.

Таблица 3 – Показатели МААД в крупных суставах конечностей и сочленениях позвоночника добровольцев при использовании различных ЭО ПЭ, n=6

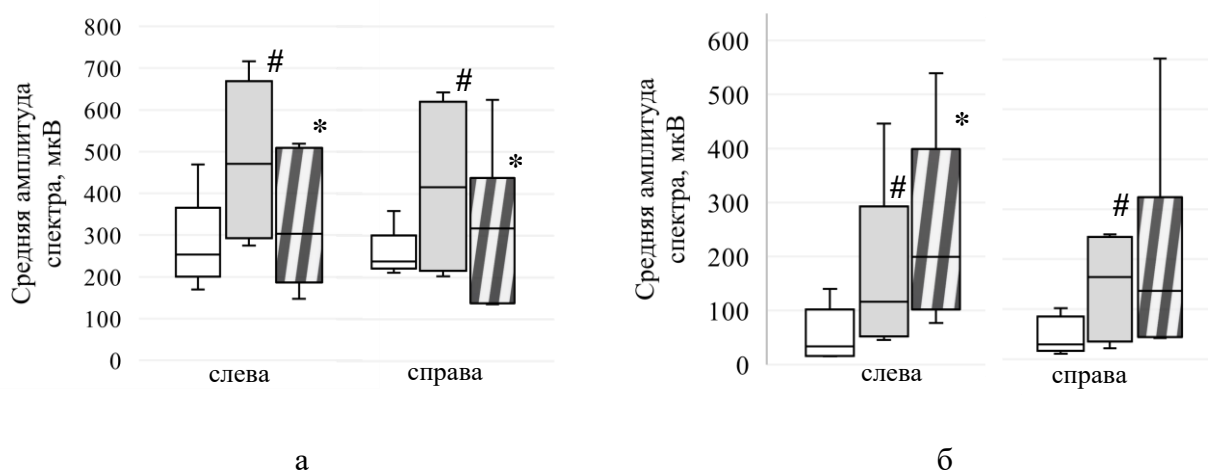
Вид движения	Сустав	Амплитуда движения, град., Ме [25; 75]		
		без применения ЭО ПЭ	с применением ЭО ПЭ	
			«Exochair»	«ExoAtlant»
Сгибание	ЛПС	156[149;170]	148[138;164]*	161[151; 175]
Разгибание	ППС	61[53;81]	58[50;71]*	64[52; 72]
Сгибание	ПЛС	124[118;134]	123[117;131]	130[123; 136]*
Сгибание	ЛТС	60[56;73]	58[44;68]*	41[40;55]*
	ПТС	68[64;71]	60[48;65]*	40[32;45]*
Отведение	ЛТС	47[42;61]	41[31;49]	12[8;17]*
	ПТС	45[33;57]	39[34;51]	12[6;20]*
Сгибание (присед)	ЛТС	85[61;98]	28[20;57]*	54[34;73]*
	ПТС	84[64;124]	30[21;61]*	51[31;69]*
Сгибание в (присед)	ЛКС	113[88;134]	52[45;60]*	99[90;110]*
	ПКС	121[102;138]	53[50;61]*	97[87;100]*
Сгибание	ЛКС	119[116;128]	61[45;74]*	110[106;115]
	ПКС	120[117;136]	57[39;73]*	111[108;117]*
Сгибание (при подъеме ноги, согнутой в КС)	ЛТС	86[81;95]	63[36;89]*	51[42;75]*
	ПТС	81[72;96]	58[42;85]*	41[38;57]*
	ЛКС	113[96;116]	75[38;89]*	95[77;105]*
	ЛКС	115[103;123]	68[30;85]*	71[64;90]*
Наклон вперед	позвоночник	69[54;72]	43[33;57]*	61 [50; 76]
Наклон вправо	позвоночник	34[29;36]	32[25;34]*	24 [20; 31]
Наклон влево	позвоночник	33[27;37]	30[22;33]*	29 [19; 33]
Поворот вправо	позвоночник	26[20;34]	16[13;22]*	11 [8; 16]*
Поворот влево	позвоночник	28[24;30]	15[11;21]*	12 [10; 16]*
Присед	позвоночник	21[12;28]	8[3;12]*	21[20; 33]

Примечание: * – статистически значимые различия по сравнению со значениями аналогичных показателей, зарегистрированных у добровольцев, не использующих ЭО ПЭ ($p \leq 0,05$)

Установлено, что массогабаритные характеристики и конструктивные особенности ЭО ПЭ «ExoAtlant» ограничивают МААД в крупных суставах нижних конечностей. Наблюдается уменьшение показателей МААД у добровольцев II группы по сравнению с аналогичными показателями I группы при сгибании в ЛТС и ПТС на 31,7% и 41,2% соответственно; отведении в ЛТС и ПТС на 74,5% и 73,3% соответственно; сгибании в ЛТС и ПТС на 36,5% и 39,3% соответственно, сгибании в ЛКС и ПКС на 12,4% и 19,8% соответственно при выполнении глубокого приседания; сгибании в ПКС на 7,5% при выполнении «захлеста голени»; сгибании в ЛТС и ПТС на 40,7% и 49,4% соответственно, а также в ЛКС и ПКС на 15,9% и 38,2% соответственно, при подъеме ноги, согнутой

в КС. Помимо этого, установлены уменьшения значений МААД в пояснично-грудном отделе позвоночника у добровольцев с использованием ЭО ПЭ при ротации вправо и влево на 57,7% и 57,1% соответственно (таблица 3).

ЭМГ-исследование показало, что удерживание груза, массой 31 кг, без применения ЭО ПЭ вызывает статистически значимое увеличение средней амплитуды спектра ЭМГ мышцы, выпрямляющей позвоночник, справа и слева (на 74,4% и 85,0%), трапециевидной мышцы справа (в 7 раз), бицепса плеча с обеих сторон в 3–5 раз и плечелучевой мышцы справа в 4 раза, относительно тестирования в рабочей позе без груза, что указывает на повышение биоэлектрической активности этих мышц за счет их активного включения в работу. Уменьшение исследуемого показателя для мышцы, выпрямляющей позвоночник, на 23,6% и 35,5% при тестировании в рабочей позе с грузом, массой 31 кг, с применением ЭО ПЭ «ЕхоAtlant» позволяет сделать вывод о снижении активности этой мышцы за счет ее разгрузки с помощью ЭО ПЭ. В то же время, увеличение средней амплитуды спектра ЭМГ для бицепса плеча слева на 72,4% в этих же тестированиях может свидетельствовать о возможном перераспределении нагрузки со спины на руки (рисунок 4).



□ – в рабочей позе без груза без использования ЭО ПЭ «ЕхоAtlant»; ■ – в рабочей позе с грузом без использования ЭО ПЭ «ЕхоAtlant»; ▨ – в рабочей позе с грузом с использованием ЭО ПЭ «ЕхоAtlant»

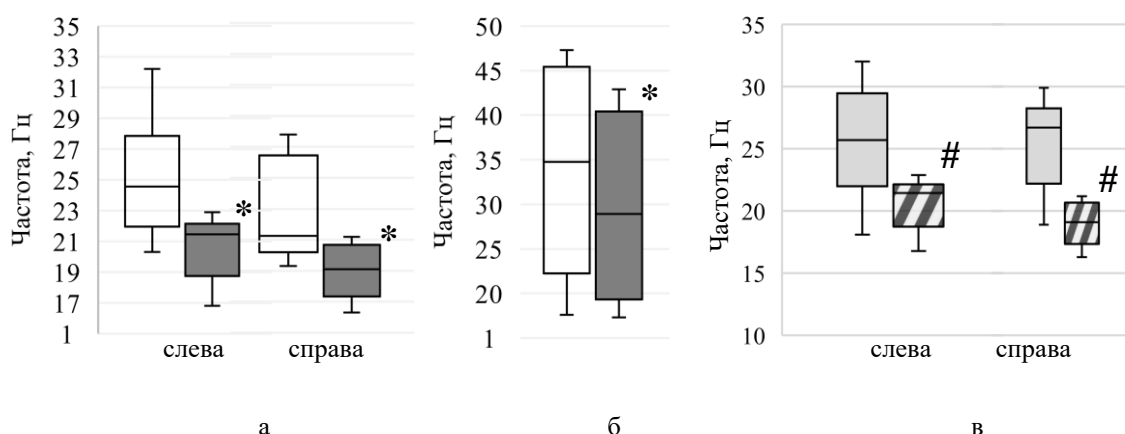
Рисунок 4 – Показатели биоэлектрической активности *m. erector spinae* (а) и *m. biceps brachii* (б) у добровольцев, n=6

Примечание: # – статистические значимые различия показателей по сравнению с фоновыми значениями ($p \leq 0,05$); * – статистические значимые различия показателей по сравнению со значениями, полученными у добровольцев без использования ЭО ПЭ «ЕхоAtlant» ($p \leq 0,05$)

Выявленное при миоэлектродметрическом исследовании статистически значимое снижение тонуса мышцы, выпрямляющей позвоночник с обеих сторон

(на 4,3%–3,3%), полусухожильной мышцы справа (на 3,3%) и медиальной широкой мышцы бедра с обеих сторон (на 3,5%–5,2%) во II группе в контрольном тестировании по сравнению с фоновыми значениями может свидетельствовать о том, что в конце работы данные мышцы находились в состоянии меньшего напряжения, чем в начале. Ввиду отсутствия аналогичных изменений в первой группе добровольцев, можно предположить, что применение ЭО ПЭ «Ехосchair» уменьшает нагрузку на некоторые мышцы спины и бедер, участвующие в поддержании рабочих поз и выполнении рабочих движений.

При проведении миотонометрии грудной и поясничной частей мышцы, выпрямляющей позвоночник, в положении добровольцев в рабочей позе с грузом, массой 31 кг, было выявлено снижение тонуса грудной части мышцы с обеих сторон во II группе по сравнению с I в контрольных тестированиях (на 28,4% и 16,5%). Эти изменения, наряду со статистически значимым уменьшением исследуемого показателя внутри группы для грудной и поясничной ее части справа на 10,1% – 15,4%, позволяют сделать вывод о том, что применение ЭО ПЭ «ЕхоAtlant» снижает нагрузку на всю мышцу, выпрямляющую позвоночник (рисунок 5). При этом нельзя исключать возможности перераспределения нагрузки со спины на другие мышечные группы.



□ – фоновое тестирование; ■ – контрольное тестирование; ◻ – без применения ЭО ПЭ «ЕхоAtlant» в рабочей позе с грузом 31 кг; ▨ – с применением ЭО ПЭ «ЕхоAtlant» в рабочей позе с грузом 31 кг

Рисунок 5 – Показатели тонуса *m. longissimus thoracis* (а), *m. iliocostalis lumborum* справа (б) и *m. longissimus thoracis* (в) у добровольцев, n=6

Примечание: * – статистические значимые различия показателей в контрольном тестировании по сравнению с фоновыми значениями ($p \leq 0,05$); # – статистические значимые различия показателей в контрольных тестированиях по сравнению с аналогичными показателями I группы ($p \leq 0,05$)

Анализ и обобщение результатов проведенных исследований позволили разработать алгоритм, дающий возможность оценивать физиолого-эргономические характеристики ПЭ (рисунок 6).



Рисунок 6 – Алгоритм проведения физиолого-эргономической оценки промышленного экзоскелета

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование позволило определить, что физиолого-эргономическую оценку промышленных экзоскелетов целесообразно проводить в условиях моделирования трудовой деятельности. Установлено, что регистрация и анализ показателей состояния кардиореспираторной системы с использованием эргоспирометрии позволяют объективно оценить физиологическую стоимость профессиональной деятельности работников физического труда в процессе моделирования трудовой деятельности при использовании различных моделей средств индивидуальной защиты, отягчающих физическую нагрузку, а также экспериментальных образцов промышленных экзоскелетов. Применение метода биомеханического «захвата движений» с использованием инерциальных датчиков позволяет объективно установить степень двигательных ограничений в крупных суставах и сочленениях позвоночного столба человека, возникающих в результате воздействия средств индивидуальной защиты, отягчающих физическую нагрузку, и промышленных экзоскелетов. Использование метода электромиографии в процессе моделирования трудовой деятельности работника физического труда позволяет установить снижение воздействия на мышцы спины при поднятии и удержании груза с использованием промышленного экзоскелета и выявить признаки перераспределения нагрузки между различными мышечными группами. Использование метода миотонометрии позволяет объективно установить снижение напряжения мышц спины и нижних конечностей у добровольцев, выполняющих физическую работу с применением промышленных экзоскелетов.

Разработанный алгоритм физиолого-эргономической оценки промышленных экзоскелетов, создает возможность повышения уровня надежности, объективности и качества проведения испытаний перспективных средств индивидуальной защиты опорно-двигательного аппарата – промышленных экзоскелетов на этапах их разработки, создания и опытной эксплуатации.

ВЫВОДЫ

1. Научно обоснован и апробирован комплекс современных медико-биологических методов физиолого-эргономической оценки промышленных экзоскелетов.
2. Тяжесть труда логиста архивно-логистического центра и грузчика логистического центра соответствует 3 классу 2 степени вредности. Основной

вклад в окончательную оценку вносят такие показатели, как рабочая поза (стоя до 80%), количество наклонов корпуса (200–280 за смену), а также масса поднимаемого и перемещаемого груза вручную постоянно в течение смены с пола (до 538,6 кг). При этом установлено, что максимальные отклонения значений углов от оптимальных наблюдаются при сгибании в плечевых, локтевых и тазобедренных суставах. Результаты оценки тяжести трудового процесса, биомеханических характеристик рабочих поз и движений работников позволили сформировать лабораторные модели их трудовой деятельности.

3. Применение метода эргоспирометрии позволило установить увеличение физиологической стоимости работы при использовании моделей СИЗ, отягчающих физическую нагрузку, характеризующееся повышением энергозатрат (на 14,0–33,3%), частоты дыхательных движений (на 5,2–6,8%) и легочной вентиляции легких (на 13,3%) на фоне увеличения продолжительности работы (на 12,5–63,5%). Применение метода эргоспирометрии при работе с использованием экспериментального образца промышленного экзоскелета позволило определить снижение ее физиологической стоимости, которое характеризовалось снижением частоты сердечных сокращений (до 11,0%), дыхательного коэффициента (до 5,0%) и энергозатрат (до 7%) на фоне увеличения производительности труда (на 13,0–37,0%).
4. Применение метода биомеханического «захвата движений» с использованием инерциальных датчиков позволило количественно установить степень ограничений движений в крупных суставах конечностей и сочленениях позвоночника, создаваемых конструктивными особенностями моделей средств индивидуальной защиты, отягчающих физическую нагрузку, и экспериментальных образцов промышленных экзоскелетов. Установлено, что применение моделей средств индивидуальной защиты негативно влияет на биомеханику движений человека, что характеризуется уменьшением показателей максимальных амплитуд активных движений в крупных суставах верхних конечностей (на 6,5–41,4%), нижних конечностей (на 8,1–29,0%), в сочленениях шейного (на 11,1–18,0%) и поясничного (на 15,0–25,0%) отделов позвоночника. Использование экспериментальных образцов промышленных экзоскелетов не способствует существенному ограничению движений в крупных суставах верхних конечностей, однако в большинстве случаев снижает максимальные амплитуды активных движений в крупных суставах нижних

конечностей (на 3,3–74,5%) и сочленениях пояснично-грудного отдела позвоночника (на 5,9–57,7%).

5. Применение метода электромиографии в процессе моделирования трудовой деятельности позволило установить снижение биоэлектрической активности мышц, выпрямляющих спину (на 23,6%–35,5%), при поднятии и удержании груза с применением промышленного экзоскелета. При этом имело место перераспределение нагрузки с мышц спины на мышцы верхних конечностей, о чем свидетельствовало одностороннее увеличение показателей биоэлектрической активности бицепса плеча (на 72,4%).
6. Применение метода миотонометрии в процессе моделирования трудовой деятельности позволило установить снижение показателей тонуса мышц спины (на 4,3%–3,3%) и нижних конечностей (на 33,0%–5,2%) после выполнения работы, а также снижение данных показателей для мышц спины (на 10,1%–28,4%) при поддержании рабочей позы с грузом у добровольцев, работающих с применением экспериментальных образцов промышленных экзоскелетов.
7. Разработанный алгоритм оценки показателей кардиореспираторной системы и опорно-двигательного аппарата работника физического труда в условиях адекватной модели трудовой деятельности позволяет проводить объективную физиолого-эргономическую оценку промышленных экзоскелетов.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Физиолого-эргономическую оценку промышленных экзоскелетов целесообразно проводить по разработанному алгоритму с применением медико-биологических методов оценки функционального состояния организма человека в условиях лабораторной модели трудовой деятельности работников физического труда – потенциальных пользователей промышленных экзоскелетов. Лабораторная модель трудовой деятельности должна быть основана на результатах оценки показателей тяжести трудового процесса и биомеханических характеристик рабочих поз и движений работников.
2. Для оценки безопасности и физиологической эффективности промышленных экзоскелетов необходимо исследовать показатели состояния кардиореспираторной системы и опорно-двигательного аппарата человека с использованием методов эргоспирометрии, биомеханического «захвата движений», электромиографии и миотонометрии.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Герегей А.М., Глухов Д.В., Ефимов А.Р. Промышленные экзоскелеты. Нормативно-методическое регулирование // Медицина труда и промышленная экология. – 2019. – Т. 59, вып. 9. – С. 598.
2. Герегей А.М., Шупорин Е.С., Тах В.Х. Современные подходы к оценке безопасности и эффективности применения промышленных экзоскелетов// Медицина труда и промышленная экология. – 2019. – Т. 59, вып. 9. – С. 599.
3. Гигиенические аспекты разработки и испытаний средств индивидуальной бронезащиты /С.М. Логаткин, Е.В. Ивченко, Е.В. Рагузин, А.М. Герегей // Военно-медицинский журнал. – 2016. – Т. 337, вып. 11. – С. 43–48.
4. Исследование локомоций в суставах верхних и нижних конечностей методом захвата движений с использованием инерциальных датчиков / А.М. Герегей, И.С. Малахова, Н.А. Ромакина, А.В. Сертакова [и др.] // В сб.: Технологические инновации в травматологии, ортопедии и нейрохирургии: интеграция науки и практики: материалы Всерос. научн.-практ. конф. с междунар. уч., Саратов, 28–29 июня 2018 г. – Саратов: Изд-во Саратов. гос. мед. ун-та им. В.И. Разумовского. – С. 52–55.
5. Современные методы оценки безопасности и физиологической эффективности применения промышленных экзоскелетов / А.М. Герегей, Е.С. Шитова, И.С. Малахова, Е.С. Шупорин [и др.] // В сб.: Анализ риска здоровью – 2020 совместно с международной встречей по окружающей среде и здоровью Rise-2020 и круглым столом по безопасности питания: материалы X Всерос. научн.-практ. конф. с междунар. уч.: в 2 т., Пермь, 13–15 мая 2020 г. / под ред. А.Ю. Поповой, Н.В. Зайцевой. – С. 366–373.
6. Современные методы оценки функционального состояния организма и физической работоспособности военнослужащего при решении научно-исследовательских задач биомедицинской направленности / А.М. Герегей, А.С. Ковалёв, О.В. Ветряков, И.С. Малахова [и др.] // Вестник Российской Военно-медицинской академии. – 2018. – N 2(62). – С. 202–208.
7. Современные методы физиолого-гигиенической и эргономической оценки средств индивидуальной защиты / А.М. Герегей, И.С. Малахова, Ю.Б. Моисеев, И.В. Иванов [и др.] // Медицина труда и промышленная экология. – 2018. – N 12. – С. 46–51.
8. Способ оценки эргономических свойств элементов боевой индивидуальной экипировки военнослужащих: пат. на изобретение RU 2671187 C1; заявл. 19.12.2017; опубл. 29.10.2018. – 24 с.
9. Тренажер для обучения горнорабочих безопасным приемам работы: пат. на полезную модель RU 171718 U1; заявл. 23.01.2017; опубл. 13.06.2017.
10. Тренажер для оценки работоспособности человека: пат. на изобретение RU 2675126 C1; заявл. 15.05.2018; опубл. 17.12.2018. – Бюл. N 27. – 6 с.
11. Физическая работоспособность и энергозатраты военнослужащих при использовании бронезиления в условиях субмаксимальных нагрузок / Е.В. Рагузин, А.М. Герегей, С.Г. Григорьев, С.М. Логаткин // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2016. – N 4. – С. 104–108.