УДК 621.865.8

БИОМЕХАНИЧЕСКАЯ И ЭРГОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАССИВНЫХ ЭКЗОСКЕЛЕТОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЯЖЕЛЫХ РАБОТ

О. Д. ИШУМБАЕВА, В. А. НИКИТИНА, И. Р. ФАЗДАЛОВА,
Д. Р. ФАТКУЛЛИН, А. А. НУРУТДИНОВ
Уфимский университет науки и технологий
Уфа, Россия

Пассивные экзоскелеты рассматриваются как носимые технические устройства, предназначенные для снижения физической нагрузки на отдельные участки опорно-двигательного аппарата человека. В отличие от активных систем, они не используют электроприводы и аккумуляторные источники питания, а создают поддерживающее усилие за счёт механических элементов: пружин, упругих тяг, рычагов и силовых рам [1]. Это делает пассивные конструкции перспективными для применения в условиях, где важны автономность, простота обслуживания, невысокая масса и устойчивость к воздействию внешней среды. Для аварийно-спасательных подразделений данные свойства особенно важны, поскольку работы часто выполняются в ограниченном пространстве, при повышенной температуре, наличии пыли, влаги и необходимости длительного перемещения с инструментом и экипировкой.

Основной биомеханический эффект пассивного экзоскелета заключается в перераспределении части нагрузки между телом пользователя и внешней конструкцией. При наклонах корпуса, подъёме и удержании груза устройство формирует дополнительный момент или опорную реакцию, уменьшая нагрузку на мышцы спины и поясничный отдел позвоночника. По данным систематического обзора, применение промышленных экзоскелетов спины в ряде задач сопровождалось снижением активности мышц спины, пиковых моментов в области L5/S1 и компрессионных сил на позвоночник [2]. При этом эффект зависит от характера работы, положения тела и соответствия конструкции антропометрическим параметрам пользователя. Следовательно, экзоскелет не устраняет физическую нагрузку полностью, а изменяет путь передачи усилий и уменьшает долю нагрузки, непосредственно воспринимаемую мышцами и позвоночником.

Эргономическая эффективность экзоскелета определяется не только величиной разгрузки, но и удобством эксплуатации. К важным требованиям относятся свобода движений, отсутствие давления на мягкие ткани, возможность регулировки по росту и размерам тела, совместимость со специальной одеждой и средствами индивидуальной защиты. Исследования показывают, что при неудобной конструкции возможны перераспределение нагрузки на другие участки тела, ограничение подвижности и снижение готовности работников

использовать устройство в течение длительного времени [2, 3]. Поэтому при разработке экзоскелета для аварийно-спасательных работ необходимо одновременно учитывать силовую схему, реальную рабочую кинематику спасателя, массу защитной экипировки и необходимость быстрого выполнения различных операций.

Для условий ликвидации чрезвычайных ситуаций целесообразно применять пассивную конструкцию с центральным несущим элементом, поясным ремнём и наружными опорами ног. Такая схема позволяет передавать часть усилия от корпуса к нижним конечностям, сохраняя при этом относительную простоту конструкции. Использование телескопических узлов обеспечивает настройку изделия под рост пользователя, а ременные крепления позволяют распределять контактные нагрузки по нескольким участкам тела. Применение стальных профильных элементов дополнительно упрощает изготовление, ремонт и замену отдельных деталей в условиях ремонтной мастерской. В то же время окончательная оценка эффективности должна проводиться экспериментально с учётом массы экипировки, длительности работы, необходимости перемещения в ограниченном пространстве и выполнения динамических действий.

Таким образом, пассивные экзоскелеты могут снижать биомеханическую нагрузку при подъёме и удержании груза, однако их практическая эффективность определяется комплексом факторов: конструкцией силовой передачи, удобством фиксации, свободой движений и соответствием конкретной рабочей задаче. Для разработанного стального экзоскелета основным направлением дальнейшей проверки является экспериментальная оценка снижения нагрузки на мышцы спины и удобства применения в условиях, приближенных к аварийно-спасательным работам. Дополнительно необходимо оценить устойчивость конструкции при несимметричной нагрузке, надёжность креплений и влияние экзоскелета на скорость выполнения типовых действий спасателя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Back-Support Exoskeletons for Occupational Use: An Overview of Technological Advances and Trends / S. Toxiri, M. B. Näf, M. Lazzaroni [et al.] // IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors. – 2019. – Vol. 7, № 3–4. – P. 237–249.

2. Effects of industrial back-support exoskeletons on body loading and user experience: an updated systematic review / T. Kermavnar, A. W. de Vries, M. P. de Looze, L. W. O'Sullivan // Ergonomics. – 2021. – Vol. 64, № 6. – P. 685–711.

3. Passive Exoskeletons to Enhance Workforce Sustainability: Literature Review and Future Research Agenda / E. H. Grosse [et al.] // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, № 9. – Art. 7339.