

Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 1 (106). С. 18–30.
Cherepovets State University Bulletin, 2022, no. 1 (106), pp. 18–30.

Научная статья

УДК 303.732.4:[658.512.2:331.101.1] ¹

<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-1-106-2>

**Визуализация и анализ информации об эргономике рабочего места
на основе компьютерного прототипирования конструкции кабины
карьерного экскаватора**

**Владимир Семенович Великанов^{1✉}, Елена Александровна Ильина²,
Юлия Витальевна Кочержинская³**

¹УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия,

¹rizhik_00@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-5581-2733>

^{2,3}Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,
Магнитогорск, Россия,

²dar_nas@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9143-4343>

³y.kocherzhinskaya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5779-2588>

Аннотация. Авторами проведено исследование системных связей показателей эргономики рабочего места машиниста, ориентированное на повышение эффективности управления карьерным экскаватором. Использование современного метода обработки информации, такого как компьютерное прототипирование, позволило выполнить визуализацию объектов управления с предварительным расчетом параметров обзорности, освещенности, габаритных размеров и внутреннего дизайна кабины карьерного экскаватора капсульного типа с антропоморфным манекеном. Разработана система эргономического проектирования, учитывающая отраслевые особенности промышленного горного оборудования.

Ключевые слова: визуальный прототип, цифровой двойник, система эргономического проектирования, карьерный экскаватор, антропоморфный манекен, моделирующая инженерия

Для цитирования: Великанов В. С., Ильина Е. А., Кочержинская Ю. В. Визуализация и анализ информации об эргономике рабочего места на основе компьютерного прототипирования конструкции кабины карьерного экскаватора // Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 1 (106). С. 18–30. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-1-106-2>.

Visualization and analysis of information on workplace ergonomics based on computer design prototyping mine excavator cab

Vladimir S. Velikanov^{1✉}, Elena A. Ilyina², Yulia V. Kocherzhinskaya³

¹Yeltsin UrFU,

Ekaterinburg, Russia,

¹rizhik_00@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5581-2733>

^{2,3}Nosov Magnitogorsk State Technical University,

Magnitogorsk, Russia,

²dar_nas@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9143-4343>

³y.kocherzhinskaya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5779-2588>

Abstract. The authors conducted a study of the systemic relationships in the indicators of the driver's workplace ergonomics. The research focused on improving the efficiency of mining excavator control. The application of modern information processing methods, such as computer prototyping, allowed visualizing control objects with preliminary calculation of visibility, illumination, overall dimensions and the capsule-type cabin design of a mining excavator including an anthropomorphic manikin. As a result, the ergonomic designing system, that takes into account the industry-specific features of industrial mining equipment, has been developed and registered.

Keywords: visual prototype, digital twin, ergonomic design system, mining excavator, anthropomorphic manikin, model-based systems engineering

For citation: Velikanov V. S., Ilyina E. A., Kocherzhinskaya Yu. V. Visualization and analysis of information on workplace ergonomics based on computer design prototyping mine excavator cab. *Cherepovets State University Bulletin*, 2022, no. 1 (106), pp. 18–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-1-106-2>.

Введение

На современном этапе развития мировой горнодобывающей промышленности определяющими факторами в достижении высоких технико-экономических показателей являются цифровизация горной отрасли и реализация основных подходов Индустрии 4.0¹. Модернизация открытых горных работ предполагает значительное увеличение объемов перерабатываемой горной массы и добычи полезных ископаемых на глубоких горизонтах карьеров. Это обуславливает необходимость использования современных высокопроизводительных горных машин и оборудования, а также совершенствования технологии добычи.

В XXI веке, когда автономные карьерные машины больше не экспериментальные, а обыденные механизмы, тем не менее, как заявляет компания Caterpillar – мировой лидер по производству техники для карьерной добычи, – не оспаривается факт важности и актуальности разработки и улучшения традиционных, управляемых человеком технологических устройств. В России одним из ключевых факторов в этом вопросе является сопоставление стоимости автоматизации добычи и перевозки полезных ископаемых со стоимостью рабочей силы, которая для добывающей компании

¹ Трачук А. В., Линдер Н. В. Инновации и производительность российских промышленных компаний // *Инновации*. 2017. № 4 (222). С. 53–65.

оказывается существенно дешевле. Успешнее всех в продвижении на этом пути стали такие страны, как Австралия, Швеция и ЮАР, где сложности в обеспечении инфраструктуры людского труда заставляют работодателя искать возможности замены живого человека роботом, поскольку данные затраты достаточно быстро окупаются¹.

По оценкам специалистов, если в России в долгосрочной перспективе можно ожидать переход на высокий уровень автоматизации горных разработок с применением беспилотных технологических машин, то в среднесрочной перспективе альтернативы человеку за рулем карьерного самосвала или горного экскаватора нет и не предвидится².

Высокая эффективность использования современных технологических устройств достигается не только благодаря их правильной эксплуатации, минимизации затрат на техническое обслуживание и ремонт, но и с помощью улучшения их эргономических показателей. Большинство изменений, которые вносятся в существующее оборудование, не говоря уже о разработке новых технологических машин, рассчитываются и проходят всестороннюю оценку параметров эффективности задолго до создания реального образца. Однако интерпретация расчетов представляет определенную сложность, поскольку даже визуализация в виде диаграмм не всегда является убедительным аргументом для принятия или отклонения того или иного технического решения³.

В данной ситуации на помощь приходят современные методы моделирования системной инженерии (Model Based System Engineering – MBSE), позволяющие создать виртуальные прототипы и цифровые двойники, предоставляющие возможность выполнить многоаспектный анализ эргономики транспортного средства любой сложности в любых моделируемых условиях в динамике⁴. Одна из ключевых особенностей таких моделей – визуальное отображение моделируемых изменений. Именно наглядность прототипа часто заставляет стейкхолдеров системы по-иному взглянуть на желаемые усовершенствования (см. рис. 1⁵).

¹ Кучумова А. Едем в роботизированное будущее // Добывающая промышленность. 2020. № 6 (24). С. 18–24.

² Ратников М. Эксперт назвал сроки начала коммерческой эксплуатации в России беспилотных автомобилей. URL: <https://forpost-sz.ru/a/2020-04-27/ehkspert-nazval-sroki-nachala-kommercheskoj-ehkspluatatii-v-rossii-bespilotnykh> (дата обращения: 03.08.2021).

³ Кочержинская Ю. В. Системный анализ документального сопровождения процесса разработки программного обеспечения // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2016. Т. 4, № 1. С. 33–41.

⁴ Madni A. M., Madni C. C., Lucero S. D. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering // Systems. 2019. Vol. 7, iss 1. URL: <https://goo.su/bQ9> (дата обращения: 03.08.2021).

⁵ Иллюстративный материал заимствован из общедоступных интернет-источников, не содержащих указаний на авторов этих изображений и каких-либо ограничений для их заимствования.



Рис. 1. Пример реалистичного визуального прототипа модели карьерного самосвала

Эффективным средством эргономического проектирования для карьерных экскаваторов являются автоматизированные системы проектирования (САПР), в состав которых входят ЭВМ, графическое устройство ввода-вывода и проблемно-ориентированное программное обеспечение. Автоматизированные системы эргономического проектирования специальных объектов развиваются в русле общего процесса автоматизации проектирования, подвергаясь его постоянному воздействию.

На сегодняшний день в большинстве системных инженерно-психологических и эргономических исследований акцент делается на антропоцентрическом подходе; его суть сводится к тому, что машина является орудием труда, с помощью которого человек может осуществлять свою деятельность. В то же время на практике данный подход вступает в конфликт с позицией многих разработчиков техники, сталкивающихся с негативными последствиями человеческого фактора на современном производстве. Например, по данным вице-президента компании «ЕВРАЗ» Константина Лагутина, 50 % трагедий на производстве происходят из-за опасных действий работников; 13 % – по причине нарушения регламента работ, технологии и очередности выполнения задач; 14 % – из-за выполнения работ, не указанных в наряде; 6 % – в результате нахождения на рабочем месте в состоянии алкогольного опьянения¹. К сожалению, подобная картина на сегодняшний день характерна для многих промышленных организаций, что обуславливает требования стейкхолдеров о максимальной автоматизации систем управления, т. е. является отражением машиноцентрического подхода². Одновременно с антропотехническим подходом появился «си-

¹ Роль человеческого фактора при возникновении несчастных случаев на производстве // Охрана труда и пожарная безопасность. 2016. № 3. URL: <https://otpb.com.ru/news/rol-chelovecheskogo-faktora-pri-vozniknovenii-neschastnyh-sluchae-v-na-proizvodstve?page=1> (дата обращения: 03.08.2021).

² Velikanov V. S., Dyorina N. V., Pikalova E. A., Yuzhakova Yu. V. Ergonomic component when designing mining machines: new scientific and practical works // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399, iss. 4. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1399/4/044009/pdf> (дата обращения: 03.08.2021).

«темно-технический» подход, для которого характерно уравнивание роли человека и техники и значимости их вклада в ценность продукта¹.

Визуализация информации с использованием метода виртуального прототипирования, с одной стороны, уменьшает вероятность ошибок на стадии проектирования, а с другой – позволяет проводить оценку машин-прототипов на основе антропометрических критериев с привлечением аппаратных и программных средств, а также предоставляет возможность сопоставлять достоинства и недостатки кабин аналогичных конструкций.

Критерии оценивания виртуального прототипа обычно подразделяют на две основные категории: технические и антропотехнические. Первые относятся только к оценке технических характеристик прототипа и позволяют судить о таких его особенностях, как функциональность, прочность, надежность и проч., а вторые – обуславливаются необходимостью наличия человека внутри машины или оборудования².

Метод виртуальных прототипов успешно используется в тяжелом и специальном машиностроении; он особенно актуален, когда речь идет о создании мелкосерийных и уникальных горных машин³.

Основная часть

Для решения задачи пространственно-антропометрической совместимости параметров машиниста с элементами рабочего места карьерного экскаватора создана и зарегистрирована система эргономического проектирования⁴, предоставляющая пользователю следующие возможности:

- проектирование рабочего места машиниста карьерного экскаватора и оборудования; моделирование поверхностей для размещения органов управления и средств отображения информации на основе моторных полей и полей зрения с установлением регулировочных параметров;
- проектирование манекена (машиниста карьерного экскаватора) с целью эргономических оценок и моделирование поверхностей для размещения тела машиниста с учетом многообразия антропометрических признаков человека.

Математическая модель «человек-машинист карьерного экскаватора» при проведении эргономического проектирования предполагает формализацию эргономических характеристик. Одним из наиболее полезных признаков с точки зрения практи-

¹ Сергеев С. Ф. Введение в инженерную психологию и эргономику иммерсивных сред. Санкт-Петербург: Издательство СПбГУ ИТМО, 2011. 258 с.

² Tokarczyk J. Method for Virtual Prototyping of Cabins of Mining Machines Operators // Archives of Mining Sciences. 2015. Vol. 60, № 1. P. 329–340.

³ Mallam S. C., Lundh M., MacKinnon S. N. Evaluating a digital ship design tool prototype: Designers' perceptions of novel ergonomics software // Applied Ergonomics. 2016. Vol. 59, part A. P. 19–26.

⁴ Великанов В. С., Шабанов А. А., Трубин В. С. Численное моделирование оптимального выбора горных машин с учетом эргономического обеспечения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014618555 от 25.08.2014.

ки промышленного дизайна является визуализация с возможностью масштабирования на экране информации о ряде отдельных физиологических свойств с целью оперативного наблюдения за общим состоянием антропоморфной модели машиниста, отдельных частей ее тела или сегментов эргономической модели¹. По антропометрическим параметрам человека визуализируется имитационная модель машиниста, после чего манекен «помещается» в виртуальную кабину условного экскаватора. Данная антропоморфная модель способствует созданию эффективного дизайна рабочего пространства реального человека-машиниста благодаря более полному учету его биомеханических особенностей и возможностей (см. рис. 2).

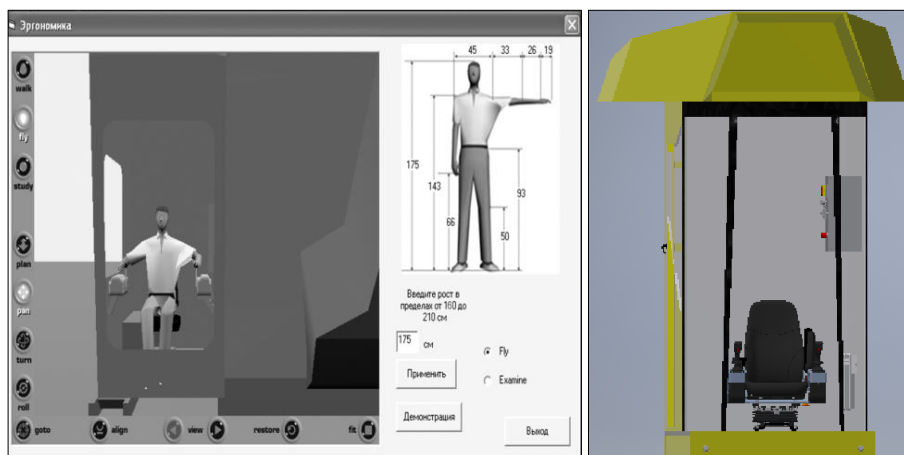


Рис. 2. Имитационные модели машиниста и кабины карьерного экскаватора

Визуализация информации о ландшафте и экскаваторе, а также антропоморфная модель машиниста данной техники выполнены при помощи программного пакета 3D Studio MAX – виртуальная реальность. Компьютерная реализация модели сделана на языке Visual Basic.

Информация в разработанной системе эргономического проектирования анализируется сразу по нескольким направлениям: во-первых, оцениваются параметры технических средств деятельности (основного рабочего места – кабины машиниста гусеничного карьерного экскаватора); во-вторых – трудовой процесс; в-третьих – характеристики производственной среды (значения освещенности и вибрации на рабочем месте); в-четвертых – индивидуальные особенности самого машиниста (антропометрические данные).

¹ Великанов В. С., Гуров М. Ю. Моделирование рабочего места оператора горной машины на основе антропометрических характеристик // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 2. С. 70–72; Великанов В. С., Исагилов К. В. Проектирование отечественных мехлопат с учетом требований рынка горной техники и эргономических показателей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 2. С. 30–32.

Структура разработанной системы эргономического проектирования включает три основные подсистемы:

- компоновка рабочего места, обзорность рабочих пространств;
- освещенность рабочих пространств экскаватора;
- виброизоляция рабочего места.

Все это позволяет использовать результаты проектирования сложной системы «человек – экскаватор» с применением ЭВМ для создания полноценного цифрового двойника в будущем.

При проектировании объектов «капсульной» системы (минимального пространства) необходимо, чтобы они не только отвечали всем заданным параметрам, но и были оптимальны по пространственным характеристикам, максимально комфортны и безопасны по эксплуатационным свойствам. Такой подход должен стать основополагающим при моделировании объектов с минимальными габаритами. Поскольку антропометрические характеристики определяют соответствие параметров «изделия» форме тела человека, распределению массы его тела, учитывают размеры головы и кисти руки, необходимо принять правильное решение о выборе габаритов конструкции «капсулы» (с учетом анатомических особенностей человеческого тела и возможности выполнения движений машинистом в различных рабочих положениях, в том числе вертикальном (стоя), во время активного использования оборудования).

Анализ результатов проведенных исследований существующих примеров эксплуатации «капсульной» системы, исходя из специфики компоновки карьерного экскаватора, габаритных размеров кабины, а также в соответствии с мировой практикой классификации кабин¹, позволил выбрать в качестве основного набор параметров “Rock Slide Protective Structures (RSPSs)” – структура кабины защищает от ударов с энергией по крайней мере 60 кДж – это значение соответствует падению крупных кусков породы в реальных условиях. Данный подход принят в проектировании кабины карьерного экскаватора.

Далее средствами программного комплекса Autodesk Inventor (система трехмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования, предназначенная для создания цифровых прототипов промышленных изделий), разработанной компанией Autodesk, выполнена виртуальная 3D-модель кабины карьерного экскаватора (за основу была принята типичная модульная кабина для такого рода техники) (см. рис. 3а).

Для обеспечения комплексной визуализации 3D-модель кабины можно дополнить виртуальной моделью антропоморфного манекена-машиниста для установления корректного соотношения проектируемой кабины и анатомических характеристик реального человека (см. рис. 3б). Антропометрические показатели машиниста карьерного экскаватора определяют, соответствуют ли размеры кабины форме тела человека, правильно ли распределяется масса его тела; при этом учитываются не только собственно анатомические особенности, но и возможность двигаться (принимая во

¹ Tokarczyk J. Method for Virtual Prototyping of Cabins of Mining Machines Operators // Archives of Mining Sciences. 2015. Vol. 60, № 1. P. 329–340.

внимание рабочее положение во время эксплуатации оборудования кабины экскаватора) (см. рис. 3в).

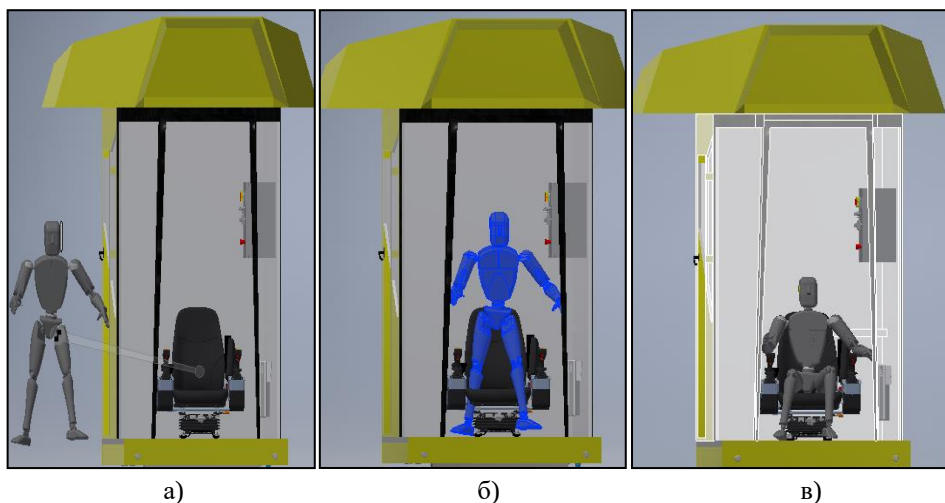


Рис. 3. 3D-модель кабины экскаватора, созданная в соответствии с RSPSs

Тенденция проектирования рабочих мест требует максимально «здоровой» и «умной» их организации. Машинист карьерного экскаватора подвержен ряду профессиональных заболеваний, таких как нарушения опорно-двигательного аппарата, вибрационная болезнь, нейросенсорная тугоухость и т. д., которые обусловлены постоянным воздействием вредных факторов на организм в течение всего времени, пока человек находится в кабине техники. В соответствии с трендами организация рабочего места должна, как минимум, не увеличивать эмерджентно нагрузку на организм работника, в идеале ей необходимо нивелировать или снижать воздействие ряда негативных факторов внешней среды.

Системный подход к организации рабочего места позволяет определить характеристики, требующие пристального внимания при принятии проектировочных решений. Одной из важных составляющих безопасности рабочего места машиниста карьерного экскаватора является управляемость – интегральный технический показатель, который демонстрирует, насколько предсказуемо и безопасно машина реагирует на управляющие действия. Совершенствование методов по определению обзорности, освещенности рабочих пространств и компоновки рабочего места машиниста как элементов управляемости экскаватора обуславливается требованиями конкурентоспособности отечественных образцов экскаваторной техники¹.

Что касается карьерного экскаватора, то будем принимать во внимание следующее: качество обзорности и видимости заданных объектов наблюдения с рабочего места машиниста данного технического устройства зависит от конструктивного со-

¹ Груздева Н. Н., Хомякова Л. П., Хусаинов В. Г. Построение картин обзорности с рабочего места машиниста экскаватора // Горная промышленность. 2002. № 3. С. 7–9.

вершенства и положения кабины относительно стрелы и кузова, площади остекления, размеров стекол, ширины и числа перемычек¹. Кроме того, важной характеристикой является визуальная информативность производственной зоны и рабочего пространства машиниста. На базе ортогональных чертежей экскаватора и натурных моделей рассредоточения взгляда с рабочего места машиниста определены зоны обязательного восприятия, установлены диапазоны значений коэффициентов обзорности объектов преимущественного и периодического наблюдения². Методической основой исследований послужила базовая методика «Построение картин обзорности с рабочего места машиниста экскаватора», основанная на ГОСТ 12.2.130-91³.

Мерой обзора каждого из заданных объектов наблюдения был выбран коэффициент обзора K_{iO} , изменяющийся в диапазоне $[0 \dots 1]$. Обзор объектов наблюдения может быть представлен поверхностью, линией или углом. Коэффициент обзора поверхности или линии определяется как отношение площади или линии видимой части объекта к общей его площади или линии необходимого обзора. Для точечных объектов коэффициент обзора равен единице в том случае, если объекты находятся в поле зрения, и нулю – при их положении вне поля зрения.

Визуализация и анализ информации об объектах наблюдения позволили разделить их на две группы:

- 1) объекты преимущественного наблюдения (забой, ковш с рукоятью, транспорт, стрела);
- 2) объекты периодического наблюдения (пульт управления, гусеницы, верхняя кромка забоя).

На основе моделирования картин обзорности и рассчитанных коэффициентов обзора определено, что видимость объектов преимущественного и периодического наблюдения в большей степени зависит от расположения кабины относительно экскаватора, рабочего места оператора и конфигурации оконных проемов.

Выводы

Таким образом, визуализация и анализ информации об эргономике рабочего места машиниста карьерного экскаватора позволили установить ряд характеристик и с помощью средств современного программного пакета Autodesk Inventor разработать виртуальную 3D-модель кабины карьерного экскаватора с антропоморфным манекеном. Модель предназначена для расчета и визуальной имитации условий нагружения в соответствии с действующими нормативными документами. Анализ результатов моделирования показал, что созданная конструкция кабины удовлетворяет мировым

¹ Волков Е. А. Исследование эффективности рабочих процессов экскаваторного оборудования при использовании дистанционного управления: дис. ... канд. техн. наук. Москва: [б. и.], 2016. 163 с.

² Конышева Л. К., Назаров Д. М. Основы теории нечетких множеств. Санкт-Петербург: Питер, 2011. 192 с.

³ ГОСТ 12.2.130–91 Система стандартов безопасности труда. Экскаваторы одноковшовые. Общие требования безопасности и эргономики к рабочему месту машиниста и методы их контроля. Москва: Издательство стандартов, 1992. 23 с.

требованиям по эргономике и технической эстетике, предъявляемым к кабинам карьерных экскаваторов.

По результатам проведенных исследований подана заявка на полезную модель конструкции кабины машиниста карьерного экскаватора, обладающей повышенной защитой от ударов и обеспечивающей безопасность работников.

Список источников

Великанов В. С., Гуров М. Ю. Моделирование рабочего места оператора горной машины на основе антропометрических характеристик // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 2. С. 70–72.

Великанов В. С., Исмагилов К. В. Проектирование отечественных мехлопат с учетом требований рынка горной техники и эргономических показателей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 2. С. 30–32.

Великанов В. С., Шабанов А. А., Трубин В. С. Численное моделирование оптимального выбора горных машин с учетом эргономического обеспечения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014618555 от 25.08.2014.

Волков Е. А. Исследование эффективности рабочих процессов экскаваторного оборудования при использовании дистанционного управления: дис. ... канд. техн. наук. Москва: [б. и.], 2016. 163 с.

ГОСТ 12.2.130–91 Система стандартов безопасности труда. Экскаваторы одноковшовые. Общие требования безопасности и эргономики к рабочему месту машиниста и методы их контроля. Москва: Издательство стандартов, 1992. 23 с.

Груздева Н. Н., Хомякова Л. П., Хусаинов В. Г. Построение картин обзорности с рабочего места машиниста экскаватора // Горная промышленность. 2002. № 3. С. 7–9.

Коньшева Л. К., Назаров Д. М. Основы теории нечетких множеств. Санкт-Петербург: Питер, 2011. 192 с.

Кочержинская Ю. В. Системный анализ документального сопровождения процесса разработки программного обеспечения // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2016. Т. 4, № 1. С. 33–41.

Кучумова А. Едем в роботизированное будущее // Добывающая промышленность. 2020. № 6 (24). С. 18–24.

Ратников М. Эксперт назвал сроки начала коммерческой эксплуатации в России беспилотных автомобилей. URL: <https://forpost-sz.ru/a/2020-04-27/ehkspert-nazval-sroki-nachala-kommercheskoj-ehkspluatatsii-v-rossii-bespilotnykh> (дата обращения: 03.08.2021).

Роль человеческого фактора при возникновении несчастных случаев на производстве // Охрана труда и пожарная безопасность. 2016. № 3. URL: <https://otpb.com.ru/news/rol-chelovecheskogo-faktora-pri-vozniknovenii-neschastnyh-sluchaev-na-proizvodstve?page=1> (дата обращения: 03.08.2021).

Сергеев С. Ф. Введение в инженерную психологию и эргономику иммерсивных сред. Санкт-Петербург: Издательство СПбГУ ИТМО, 2011. 258 с.

Трачук А. В., Линдер Н. В. Инновации и производительность российских промышленных компаний // Инновации. 2017. № 4 (222). С. 53–65.

Madni A. M., Madni C. C., Lucero S. D. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering // Systems. 2019. Vol. 7, iss 1. URL: <https://goo.su/bQ9> (дата обращения: 03.08.2021).

Mallam S. C., Lundh M., MacKinnon S. N. Evaluating a digital ship design tool prototype:

Designers' perceptions of novel ergonomics software // *Applied Ergonomics*. 2016. Vol. 59, part A. P. 19–26.

Tokarczyk J. Method for Virtual Prototyping of Cabins of Mining Machines Operators // *Archives of Mining Sciences*. 2015. Vol. 60, № 1. P. 329–340.

Velikanov V. S., Dyorina N. V., Pikalova E. A., Yuzhakova Yu. V. Ergonomic component when designing mining machines: new scientific and practical works // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1399, iss. 4. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1399/4/044009/pdf> (дата обращения: 03.08.2021).

References

Velikanov V. S., Gurov M. Iu. Modelirovanie rabocheho mesta operatora gornoi mashiny na osnove antropometricheskikh kharakteristik [Modeling of the workplace for the mining machine operator based on anthropometric characteristics]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2008, no. 2, pp. 70–72.

Velikanov V. S., Ismagilov K. V. Proektirovanie otechestvennykh mekhlopat s uchetom trebovaniy rynka gornoi tekhniki i ergonomicheskikh pokazatelei [Designing of home-produced shovels taking into account the requirements of the mining equipment market and ergonomic parameters]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2009, no. 2, pp. 30–32.

Velikanov V. S., Shabanov A. A., Trubin V. S. *Chislennoe modelirovanie optimal'nogo vybora gornykh mashin s uchetom ergonomicheskogo obespecheniia. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM № 2014618555 ot 25.08.2014* [Numerical modeling of the optimal choice of mining machines with the consideration of ergonomic support. Certificate of state registration of computer program No. 2014618555 dated 25.08.2014].

Volkov E. A. *Issledovanie effektivnosti rabochnik protsessov ekskavatornogo oborudovaniia pri ispol'zovanii distantsionnogo upravleniia* [Research on the efficiency of working processes of excavating equipment when using remote control: Cand. thesis in Technical Sciences]. Moscow, 2016. 163 p.

GOST 12.2.130–91 *Sistema standartov bezopasnosti truda. Ekskavatory odnokovshovye. Obshchie trebovaniia bezopasnosti i ergonomiki k rabochemu mestu mashinista i metody ikh kontroliia* [GOST 12.2.130–91 (State Standard) Occupational safety standards system. Single-bucket excavators. General safety and ergonomic requirements for the operator's position and methods of their control]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1992. 23 p.

Gruzdeva N. N., Khomiakova L. P., Khusainov V. G. Postroenie kartin obzornosti s rabocheho mesta mashinista ekskavatora [Modeling the perimeter of visibility from an excavator operator workplace]. *Gornaia promyshlennost'* [Russian Mining Industry Journal], 2002, no. 3, pp. 7–9.

Konysheva L. K., Nazarov D. M. *Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv* [Fundamentals of the theory of fuzzy sets]. St Petersburg: Piter, 2011. 192 p.

Kocherzhinskaia Iu. V. Sistemnyi analiz dokumental'nogo soprovozhdeniia protsessa razrabotki programmnogo obespecheniia [System analysis of documentary support software development process]. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie sistem v promyshlennoi i sotsial'noi sferakh* [Software of systems in the industrial and social fields], 2016, vol. 4, no. 1, pp. 33–41.

Kuchumova A. Edem v robotizirovannoe budushchee [Go to the robotic future]. *Dobyvaiushchaia promyshlennost'* [Mining industry], 2020, no. 6 (24), pp. 18–24.

Ratnikov M. *Ekspert nazval sroki nachala kommercheskoi ekspluatatsii v Rossii bespilotnykh avtomobilei* [Expert called the time limits for the commercial exploitation of self-driving cars in

Russia]. Available at: <https://forpost-sz.ru/a/2020-04-27/ehkspert-nazval-sroki-nachala-kommercheskoj-ehksploatatsii-v-rossii-bespiilotnykh> (accessed: 03.08.2021).

Rol' chelovecheskogo faktora pri vozniknovenii neschastnykh sluchaev na proizvodstve [The role of the human factor in work accidents]. *Okhrana truda i pozharnaia bezopasnost'* [Industrial safety and fire protection], 2016, no. 3. Available at: <https://otpb.com.ru/news/rol-chelovecheskogo-faktora-pri-vozniknovenii-neschastnykh-sluchaev-na-proizvodstve?page=1> (accessed: 03.08.2021).

Sergeev S. F. *Vvedenie v inzhenernuu psikhologiiu i ergonomiku immersivnykh sred* [Introduction to engineering psychology and ergonomics of immersive environments]. St Petersburg: Izdatel'stvo SPbGU ITMO, 2011. 258 p.

Trachuk A. V., Linder N. V. Innovatsii i proizvoditel'nost' rossiiskikh promyshlennykh kompanii [Innovations and productivity of the Russian industrial companies]. *Innovatsii* [Innovations], 2017, no. 4 (222), pp. 53–65.

Madni A. M., Madni C. C., Lucero S. D. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*, 2019, vol. 7, iss 1. Available at: <https://goo.su/bQ9> (accessed: 03.08.2021).

Mallam S. C., Lundh M., MacKinnon S. N. Evaluating a digital ship design tool prototype: Designers' perceptions of novel ergonomics software. *Applied Ergonomics*, 2016, vol. 59, part A, pp. 19–26.

Tokarczyk J. Method for Virtual Prototyping of Cabins of Mining Machines Operators. *Archives of Mining Sciences*, 2015, vol. 60, no. 1, pp. 329–340.

Velikanov V. S., Dyorina N. V., Pikalova E. A., Yuzhakova Yu. V. Ergonomic component when designing mining machines: new scientific and practical works. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1399, iss. 4. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1399/4/044009/pdf> (accessed: 03.08.2021).

Сведения об авторах

Владимир Семенович Великанов – доктор технических наук, доцент; <https://orcid.org/0000-0001-5581-2733>, rzhik_00@mail.ru, УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (д. 19, ул. Мира, 620002 г. Екатеринбург, Россия); **Vladimir S. Velikanov** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; <https://orcid.org/0000-0001-5581-2733>, rzhik_00@mail.ru, Yeltsin UrFU (19, ul. Mira, 620002 Ekaterinburg, Russia).

Елена Александровна Ильина – кандидат педагогических наук, доцент; <https://orcid.org/0000-0002-9143-4343>, dar_nas@mail.ru, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 г. Магнитогорск, Россия); **Elena A. Ilina** – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor; <https://orcid.org/0000-0002-9143-4343>, dar_nas@mail.ru, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin pr, 455000 Magnitogorsk, Russia).

Юлия Витальевна Кочержинская – кандидат технических наук, доцент; <https://orcid.org/0000-0001-5779-2588>, y.kocherzhinskaya@mail.ru, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 г. Магнитогорск, Россия); **Yulia V. Kocherzhinskaya** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; <https://orcid.org/0000-0001-5779-2588>, y.kocherzhinskaya@mail.ru, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin pr, 455000 Magnitogorsk, Russia).

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.08.2021; одобрена после рецензирования 14.10.2021; принята к публикации 25.10.2021.

The article was submitted 11.08.2021; Approved after reviewing 14.10.2021; Accepted for publication 25.10.2021.