

## Визуализация и анализ информации на основе компьютерного моделирования испытаний кабины карьерного гусеничного экскаватора на соответствие требованиям безопасности

В.С. Великанов<sup>1</sup>✉, Е.А. Ильина<sup>2</sup>, Ю.В. Кочержинская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>2</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация

✉rizhik\_00@mail.ru

### Резюме

На современном этапе развития мировой горнодобывающей промышленности определяющим фактором в достижении высоких технико-экономических показателей является комплексное решение теоретических и прикладных проблем горной сферы в контексте реализации основных подходов Индустрии 4.0. В статье решены вопросы системного анализа результатов компьютерного моделирования испытаний кабины карьерного гусеничного экскаватора на соответствие техническим требованиям, предъявляемым к кабине экскаватора. Цель исследования – выявить и наглядно продемонстрировать на разработанной модели места, наиболее подверженные деформации в конструкции кабины карьерного гусеничного экскаватора, с точки зрения эргономики и безопасности этой кабины как рабочего места. Одна из главных решаемых задач – локализация таких сегментов при возникновении динамических нагрузок. В программном комплексе AutodeskInventor разработана 3D-модель кабины для виртуального моделирования с применением метода конечных элементов и расчетов напряженно-деформированного состояния несущих элементов металлоконструкции кабины экскаватора. При разработке трехмерной модели кабины карьерного экскаватора учтена дополнительная информация, а именно: жесткое соединение сиденья с кабиной, толщина листов обшивки каркаса, необходимая площадь остекления. С учетом этих составляющих было проведено моделирование нагружения кабины карьерного экскаватора и визуализированы результаты компьютерных расчетов. Анализ результатов этого этапа работы показал обоснованность принятых технических решений в совершенствовании конструкции кабины и позволил разработать рекомендации для внесения изменений в проектируемые изделия.

### Ключевые слова

добыча ископаемых, карьерный экскаватор, визуализация и анализ данных, виртуальная модель, эргономическое обеспечение

### Для цитирования

Великанов В.С. Визуализация и анализ информации на основе компьютерного моделирования испытаний кабины карьерного гусеничного экскаватора на соответствие требованиям безопасности / В.С. Великанов, Е.А. Ильина, Ю.В. Кочержинская // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3(75). – С. 196–206. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).196-206.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 13.07.2022 г.; поступила после рецензирования: 13.09.2022 г.; принята к публикации: 14.09.2022 г.

## Visualization and analysis of information based on computer simulation of the quarry tracked excavator cabin tests for the compliance with safety requirements

V.S. Velikanov<sup>1</sup>✉, E.A. Il'ina<sup>2</sup>, Yu.V. Kocherzhinskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, the Russian Federation

<sup>2</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, the Russian Federation

✉rizhik\_00@mail.ru

### Abstract

The article is related to the system analysis of the computer simulation results for the quarry crawler excavator cab's compliance tests with the technical requirements. The purpose of the research is to identify and demonstrate on the developed model the places that are most susceptible to deformation in the design of the quarry crawler excavator' cab, in terms of ergonomics and safety of it as a workplace. The main task is the localization of such segments when dynamic loads occur. The virtual dynamic model of the cabin is developed with the use of the finite element method and the calculations of the stress-strain state of the load-bearing excavator cabin elements with the AutodeskInventor software. By developing a 3D model of the quarry excavator cab we took into account some additional information as: the rigid connection of the seat with the cab, the thickness of the sheeting of the frame, the required area of the glazing. According to this conditions, the simulation of the cab's loading was successful-

ly done and the results of computer calculations were visualized. The analysis of the results of this stage showed the validity of the accepted technical solutions to improve the design of the cabin and allowed to develop recommendations for changes in the designed products.

### Keywords

mining, mining excavator, computer simulation, data visualization and analysis, virtual model; ergonomic support

### For citation

Velikanov V.S., Il'ina E.A., Kocherzhinskaya Yu.V. Vizualizatsiya i analiz informatsii na osnove komp'yuternogo modelirovaniya ispytaniy kabiny kar'ernogo gusenichnogo ekskavatora na sootvetstvie trebovaniyam bezopasnosti [Visualization and analysis of information based on computer simulation of the quarry tracked excavator cabin' tests for the safety requirements accordance]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 196–206. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).196-206.

### Article info

Received: July 13, 2022; Revised: September 13, 2022; Accepted: September 14, 2022

### Введение

Горнодобывающая промышленность – это рабочий локомотив мировой экономики. Постоянная потребность в минерально-сырьевых ресурсах определяет интенсивное развитие техники и технологии их добычи. При открытой добыче полезных ископаемых выполняются взаимосвязанные основные и вспомогательные технологические операции, они, в конечном итоге, и определяют тип применяемой горной машины.

Экскавация горной массы и полезных ископаемых является одной из основных в цепочке основных производственных процессов горного производства, которая позволяет обеспечить занятость представителей всех последующих звеньев технологии переработки полезных ископаемых в конечный продукт. Экскаваторы используются для выемки и погрузки горных пород в транспортные средства, при перегрузке руды и вскрышных пород на внутрикарьерных перегрузочных пунктах, а также при железнодорожном способе отвалообразования. Экскаватор карьерный гусеничный (ЭКГ) – это основная горная машина, используемая на отечественных железорудных карьерах, а также при добыче цветных металлов и строительных материалов. Уровень технического оснащения современных карьерных экскаваторов достаточно высок, они оснащены современными системами электроприводов основных механизмов, информационно-диагностическими системами, комплексами регистрации и передачи данных в единую внутрикарьерную диспетчерскую сеть.

Установлено, что качество управления карьерным экскаватором определяется уровнем квалификации машиниста и эргономическим обеспечением его рабочего места и влияет на

эксплуатационную производительность. Обработка статистических данных по работе экскаваторов на железорудных месторождениях Южного Урала показала, что сохраняется тенденция к снижению эксплуатационной производительности и увеличению процента отказов основных рабочих механизмов. Это определяется следующими основными факторами: недостаточная проработка рабочего места с точки зрения эргономики, утомляемость машиниста, сверхнормативные нагрузки и др. [1–5].

В ряде работ [6–10] рассмотрена возможность использования основных подходов метода виртуальных прототипов (цифровых двойников) для создания современных образцов горной техники. В общем случае использование данного метода позволяет:

- уменьшить вероятность ошибок при проектировании;
- проводить эргономическую оценку прототипов машин на основе антропометрических критериев с использованием программных комплексов, что позволяет проводить сравнительную оценку кабин.

Оценка виртуального прототипа в основном проводится с помощью технических и антропотехнических критериев.

Технические критерии относятся только к оценке технических характеристик, они позволяют оценить такие особенности прототипа, как функциональность, прочность, надежность и др.

Антропотехнические критерии обусловлены наличием человека внутри машины или оборудования.

#### 1. Эргономические критерии:

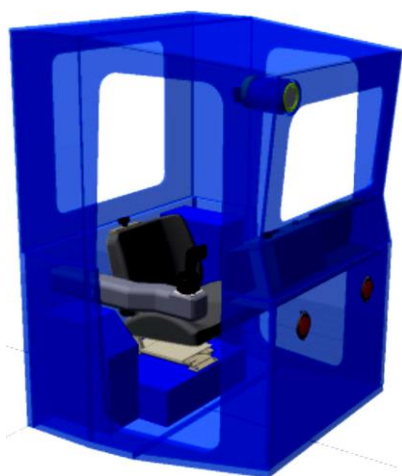
- диапазон конечностей – идентификация зон диапазона и зон комфорта, включая необходимость работы в неудобных позах тела;

- поле зрения;
- нагрузки в мышечно-скелетной системе

– способность воздействовать силами и крутящими моментами на конечности.

## 2. Критерии безопасности:

- защита от механических опасностей;
- критерий травмы головы;
- шум и вибрация;
- риск проскальзывания, спотыкания, падения;
- правильное освещение (отсутствие затененных областей, бликов и стробоскопического эффекта (рис. 1) [10].



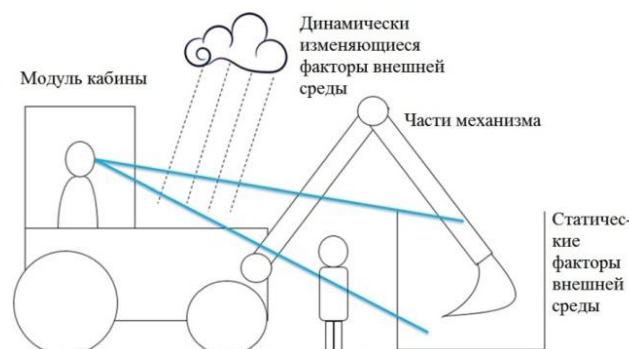
**Рис. 1.** Виртуальный прототип кабины подземного локомотива

**Fig. 1.** Virtual prototype of an underground locomotive cab

Цель исследования – выявить и наглядно продемонстрировать на разработанной модели места, наиболее подверженные деформации в конструкции кабины карьерного гусеничного экскаватора, с точки зрения эргономики и безопасности этой кабины как рабочего места.

Производительность оператора также может снизиться из-за неудобной позы, принятой для работы в условиях плохой видимости. Операторы постоянно принимают решения при работе с машиной на основе того, что могут видеть. Обзор может быть затруднен из-за рамы кабины или частей машины за пределами кабины (например, стрела или рукоять экскаватора), погодные и световые условия (туман, дождь), темнота, блики или иные объекты в непосредственной близости (другие технологические машины, сформировавшийся профиль выработки). Объекты, которыми манипулирует сама

горная машина, могут уменьшить видимость. Видимость – краеугольный камень эргономики рабочего места оператора горной машины. Он должен иметь возможность видеть цель в любое время, эргономика кабины должна способствовать эффективному выполнению задачи и безопасности рабочих операций. Основные факторы, снижающие видимость оператора горной машины, приведены на рис. 2 [11].



**Рис. 2.** Факторы, снижающие видимость оператора  
**Fig. 2.** Factors reducing visibility for operator

Развитию системных взглядов на вопросы эргономики горного оборудования посвящены труды по механизированной добыче полезных ископаемых, повышению безопасности горношахтного оборудования посредством промышленного дизайна, ориентированного на человека, защитным конструкциям для горных машин, компьютерному анализу параметров кабины машиниста транспортного средства, эргономической оценке кабины крана в металлургической промышленности, методам расчета высоты сиденья с акцентом на оптимальное положение человека на основе тригонометрических соотношений, оценке обзорных качеств кабин различных типов, анализу вибрации на сиденье машиниста [12–19].

## Материалы и методы

Важное требование при создании любой технологической машины, управляемой человеком – обеспечение безопасности ее конструкции в целом и безопасности рабочего места машиниста. В соответствии с требованиями, металлоконструкции кабины машиниста карьерного экскаватора должны иметь достаточную прочность и несущую способность по прилагаемым знакопеременным динамическим нагрузкам. Конструктивное исполнение кабины

карьерного экскаватора должно обеспечивать эффективное поглощение энергии удара с сохранением остаточного пространства внутри кабины для безопасности машиниста [5].

На основе обработки большого объема научно-технической литературы на этапе анализа кабин карьерных экскаваторов рассмотрено следующее:

- современные тенденции в дизайне кабин технологических машин;
- кабины зарубежных аналогов ЭКГ и их дизайнерские решения;
- компоновка приборов управления в соответствии с эргономическими требованиями и возможностью применения современных систем управления основными электроприводами;
- остекление кабины;
- применение системы отопления, вентиляции и кондиционирования;
- снижение вибрации;
- внутренняя облицовка;
- качество осветительных приборов (рис. 3).

Горные машины, эксплуатируемые на карьерах и разрезах, как правило, работают в сложных горно-геологических условиях и с учетом квалификации машинистов вероятность возникновения аварийных и внештатных ситуаций достаточно велика. Анализ условий эксплуатации карьерных экскаваторов и автосамосвалов, а также буровых станков показал, что наличие значительных уклонов и препятствий может приводить к опрокидыванию машин и завалам. В России основные требования к безопасности карьерных машин регламентируются стандартом ISO 3471 «Машины землеройные. Устройство защиты при опрокидывании. Технические требования и лабораторные испытания». Данный документ определяет технические требования к металлоконструкциям при опрокидывании машины, а также единообразие методов оценки

на соответствие этим требованиям.

К достижению высокого качества конструкции кабины карьерного экскаватора возможно прийти путем проведения расчетных и экспериментальных исследований с обязательным учетом требований безопасности и эргономических показателей, что приводит к снижению металлоемкости кабины и повышению эффективности эксплуатации карьерного экскаватора в целом.

Следовательно, проведение дальнейших исследований, направленных на создание и модернизацию кабин карьерной техники с учетом требований по эргономике, а также на оптимизацию параметров конструкции, актуально и востребовано.

Инновационный подход в сфере создания современных образцов карьерной техники заключается в разработке карьерных экскаваторов большой единичной мощности. Компоновочные решения предполагают использование в конструкции экскаватора модульной кабины. При создании кабин современных горностроительных машин применяют следующие принципы:

- каркас кабины должен обеспечивать эффективную защиту человека при опрокидывании машины – Roll Over Protective Structures (ROPSs);
- установка защитного навеса на раму кабины оператора (необходим для защиты человека при падении материала сверху) – Falling Object Protective Structures (FOPSs).

Первый уровень – конструкция кабины защищает от ударов с энергией, не превышающей 1,4 кДж, что соответствует ударам мелкокусковой породы или ручного инструмента.

Второй уровень – конструкция кабины обеспечивает защиту от ударов с энергией до 11,6 кДж и обрушения деревьев или средних кусков породы.



Рис. 3. Варианты модульных кабин карьерных экскаваторов  
Fig. 3. Variations of modular cabins of quarry excavators

Третий уровень – каркас кабины защищает от ударов крупных кусков материала с энергией 60 кДж – Rock Slide Protective Structures (RSPSS).

Четвертый уровень – конструкция каркаса кабины эквивалентная ROPS и отнесена к строительным экскаваторам – Tip Over Protective Structures (TOPS).

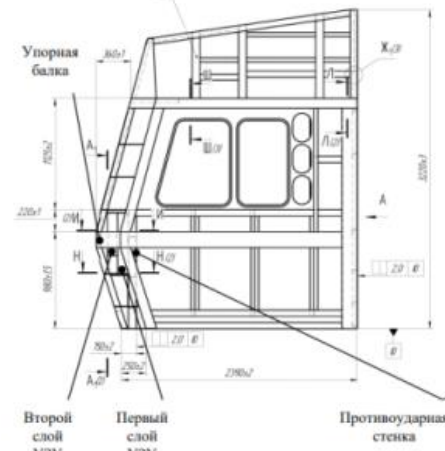
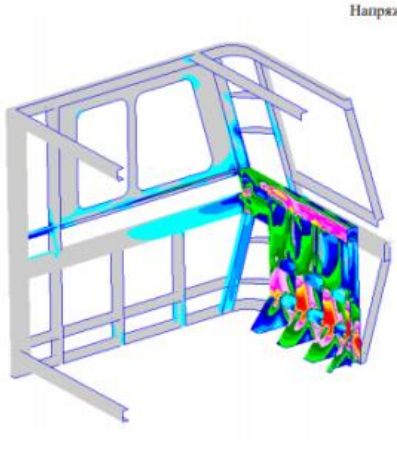
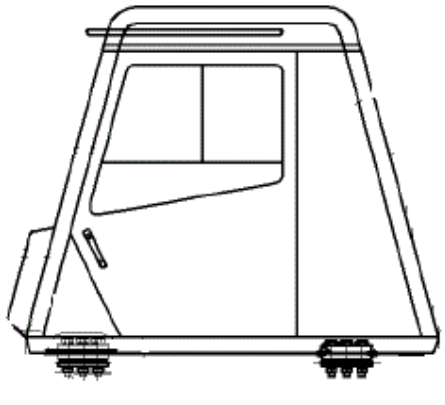
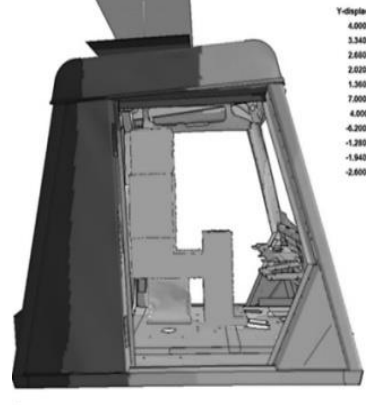
Стандарты ROPS и FOPS регламентируют проектирование и производство кабин операторов с использованием конструктивных элементов безопасности. Это является обязательным условием для сертификации горных машин на допуск к работе при открытой разработке полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях. Практика создания кабин карьерных экскаваторов заключается в

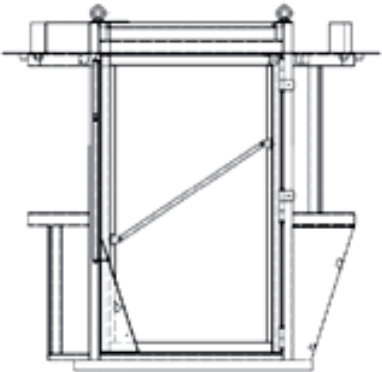
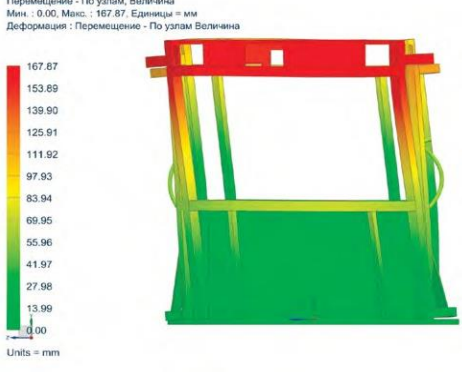
нахождении оптимального соотношения между требуемыми техническими показателями и экономической целесообразностью реализации проектных решений. В общем случае необходим определенный компромисс, обеспечивающийся минимизацией экономических затрат при сохранении нормируемых технических показателей конструкционной защиты кабины.

Необходимо отметить, что вопросы обеспечения безопасности кабин и моделирование их испытаний, реализованные в виде расчетных программных комплексов, достаточно подробно представлены в многочисленных научных публикациях. В таблице с учетом опыта ранее выполненных работ представлен краткий обзор по моделированию испытаний кабин различных машин [20–32].

## Результаты моделирования кабин

## Results of cabin modeling

Оборудование / <i>Equipment</i>	Компьютерное моделирование / <i>Computer simulation</i>	Результаты нагружения кабины / <i>Cabinloading' results</i>
Локомотив / <i>Locomotive</i>		
Карьерный самосвал / <i>Dumper</i>		

Оборудование / Equipment	Компьютерное моделирование / Computer simulation	Результаты нагружения кабины / Cabinloading' results
Бульдозер / Bulldozer		

Известно, что использование в научных исследованиях натурного эксперимента характеризуется высокими затратами времени и материальных средств, а кроме того, имеет ограничения по количеству исследуемых параметров.

### Компьютерное моделирование испытаний кабины и визуализация их результатов

Компьютерное моделирование позволяет снизить затраты времени и средств на разработку конструкций. Подобного рода задачи решаются с использованием метода конечных элементов.

В программном комплексе Autodesk Inventor разработана 3D-модель кабины для виртуального моделирования с применением метода конечных элементов и расчетов напряженно-деформированного состояния несущих элементов металлоконструкции кабины экскаватора.

Autodesk Inventor – система трехмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования (САПР), предназначенная для создания цифровых прототипов любых промышленных изделий. Возможности Autodesk Inventor обеспечивают полный цикл проектирования и создания конструкторской документации:

- моделирование (2D-/3D) с возможностью визуализации проектов;
- разработка различного рода изделий из листового материала с возможностью создания разверток;
- проектирование электрических систем;
- проекты для литья пластика;
- динамическое моделирование;

- параметрический расчет напряженно-деформированного состояния деталей и сборок;
- актуальное обновление конструкторской документации [19].

Исходными данными для моделирования приняты геометрические размеры модульной кабины экскаватора, нагрузки, действующие на каркас кабины при ее нагружении, марка материала и его свойства, масса кабины с возможностью ее варьирования от 500 до 2 500 кг. При разработке трехмерной модели кабины карьерного экскаватора нами учтена дополнительная информация, а именно: жесткое соединение сиденья с кабиной, толщина листов обшивки каркаса, необходимая площадь остекления [5]. Специфика компоновки карьерного экскаватора предполагает использование специальной площадки для крепления модуля кабины, чтобы 3D-модель кабины соответствовала не только всем заданным пропорциям и геометрическим размерам, но и была оптимальной по пространственным характеристикам, максимально удобной и безопасной по эксплуатационным свойствам. Кроме того, созданный виртуальный прототип кабины карьерного экскаватора дает возможность моделировать обзорность с рабочего места машиниста, производить оценку визуальной информативности зоны карьерного забоя и рабочего пространства машиниста. Реализация возможностей программного комплекса Autodesk Inventor позволит также осуществить и эргономическую оценку кабины на соответствие спецификации требованиям заказчика.

Каркас кабины экскаватора должен обеспечить защиту машиниста от возможного падения крупных кусков пород сверху (нависающих «козырьков»), глыб и отдельных крупных валу-

нов), защиту машиниста при опрокидывании экскаватора с карьерного уступа и др. (рис. 4). К каркасу кабины последовательно прикладывают боковую и вертикальную нагрузки. Рабочие моменты моделирования испытаний приведены на рис. 5.

К каркасу кабины последовательно прикладывают боковую и вертикальную нагрузки. Рабочие моменты моделирования испытаний приведены на рис. 5.

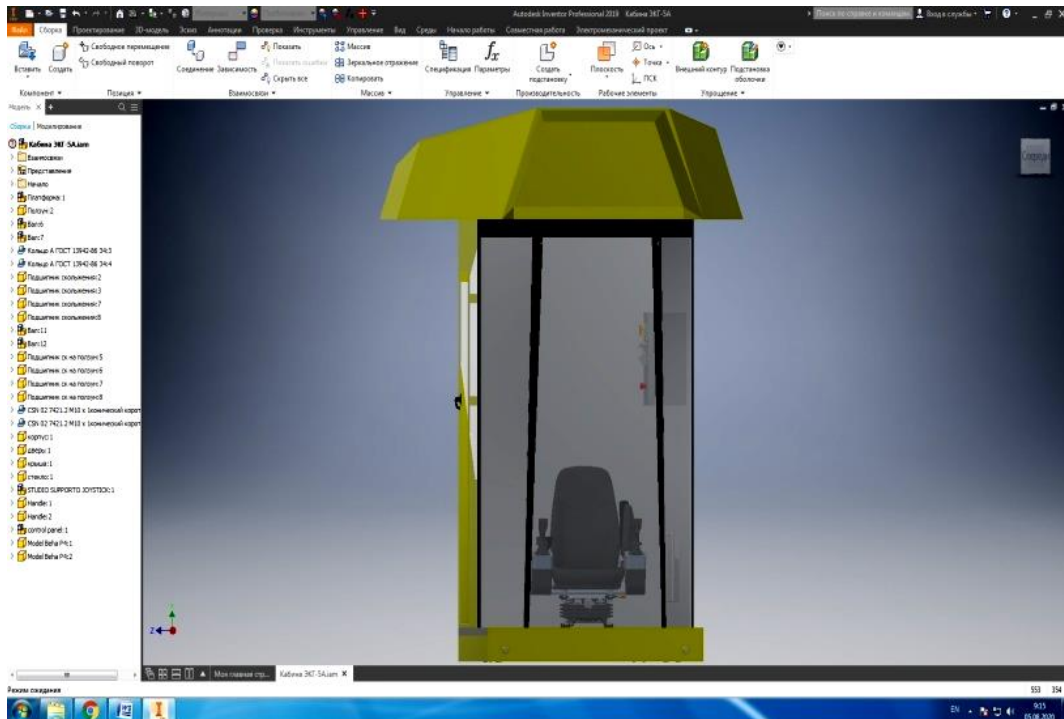
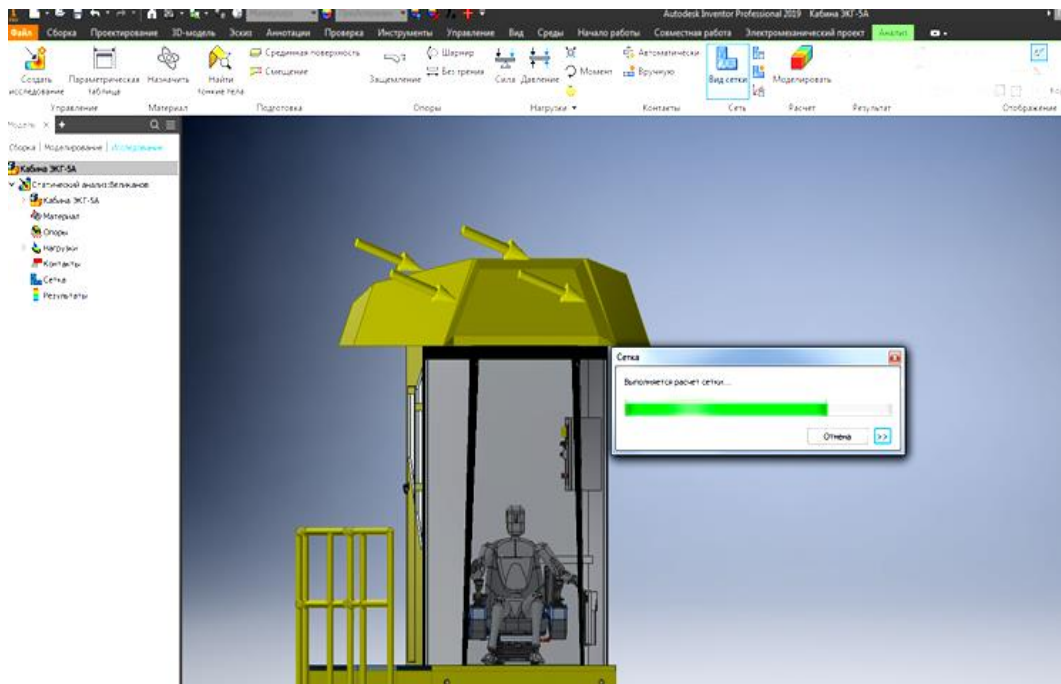
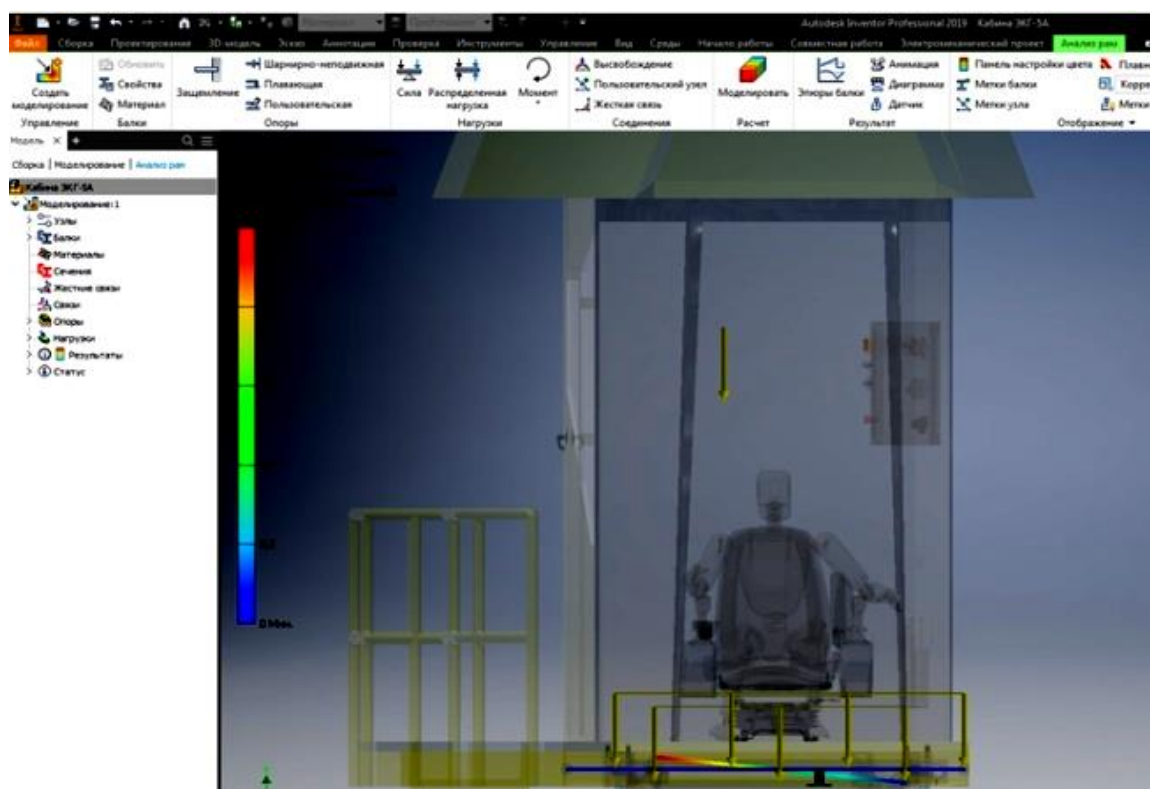


Рис.4. 3D-визуализация модели кабины экскаватора, разработанная в соответствии RSPSs

Fig. 4. 3D-visualization of excavator cabin model developed in accordance with RSPSs



а



б

Рис. 5. Визуализация данных испытаний кабины карьерного экскаватора при приложении:

*a* – боковой нагрузки; *б* – вертикальной нагрузки

Fig. 5. Visualization of testing data for quarry excavator cabin under application of

*a* – lateral loading; *b* – vertical loading

### Заключение

Проведено моделирование кабины карьерного экскаватора с использованием современного пакета Autodesk Inventor, предназначенного для расчета и компьютерного моделирования условий нагружения, в соответствии с действующими нормативными документами. Расчетная модель визуализирована в формате 3D.

С целью повышения прочности кабины проведены исследования при различных видах нагружения по оценке влияния отдельных си-

ловых элементов на работоспособность конструкции.

Анализ результатов моделирования показал, что созданная конструкция кабины удовлетворяет мировым требованиям, предъявляемым к кабинам карьерных экскаваторов.

По результатам проведенных исследований подана заявка на полезную модель конструкции кабины машиниста карьерного экскаватора с повышенной безопасностью и защитой от ударов.

### Список литературы

1. Тарасов М.А. Моделирование параметров функционирования выемочной машины с вибрационным воздействием на горные породы // Устойчивое развитие горных территорий. 2019. Т. 11. № 1 (39). С. 85–97.
2. Седнев В.А., Копнышев С.Л., Седнев А.В. Исследование этапов процесса и обоснование математической модели расширения сферической полости в грунтах и горных породах // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12. № 2 (44). С. 302–314.
3. Моделирование и оптимизация режимов работы горных машин с использованием среды Matlab / В.С. Великанов, И.Г. Усов, А.А. Абдрахманов и др. // Горный журнал. 2017. № 12. С. 78–81.
4. Осинцев Н.А. Управления безопасностью производства на рабочих местах с применением аппарата теории нечетких множеств // Вестн. Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2008. № 4 (24). С. 83–85.
5. Velikanov V.S., Kozur A.V., Dyorina N.V. Engineering implementation of view objectives in mine excavator design // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. Pp. 1592–1596.
6. Aromaa S., K. Vaananen Suitability of virtual prototypes to support human factors/ergonomics evaluation during the design // Applied ergonomics. 2016. Vol. 56. Pp. 11–18.



7. Chakraborty P.R., Bise C.J. A virtual-reality-based model for task-training of equipment operators in the mining industry // *Mineral resources engineering*. 2000. Vol. 9, Ed. 4. Pp. 437–449.
8. Du Y., Dorneich M.C., Steward B. Virtual operator modeling method for excavator trenching // *Automation in construction*. 2016. Vol. 70. Pp. 14–25.
9. 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.
10. Tokarczyk J. Method for virtual prototyping of cabins of mining machines operators // *Archives of mining sciences*. 2015. Vol. 60, Ed.1. Pp. 329–340.
11. Aromaa S., Goriachev V., Kymäläinen T. Virtual prototyping in the design of see-through features in mobile machinery // *Virtual Reality*. 2020. Vol. 24, Ed. 1. Pp. 23–37. DOI 10.1007/s10055-019-00384-y.
12. A new method for calculating saddle seat height with an emphasis on optimal posture based on trigonometric relations / H. Babaei, M. Razeghi, A. Choobineh et al. // *International journal of occupational safety and ergonomics*. 2016. Vol. 22, Ed. 4. Pp. 565–571.
13. Balaji K., Alphin M.S. Computer-aided human factors analysis of the industrial vehicle driver cabin to improve occupational health // *International journal of injury control and safety promotion*. 2014. Vol. 23, Ed. 3. Pp. 240–248.
14. Evaluation of operator visibility in three different cabins type Far-East combine harvesters / D.H. Lee, Y.J. Kim, C.H. Choi et al. // *International journal of agricultural and biological engineering*. 2016. Vol. 9, Ed. 4. Pp. 33–44.
15. Horberry T., Burgess-Limerick R., Cooke T., Steiner L. Improving mining equipment safety through human-centered design // *Ergonomics in design: Quarterly of human factors applications*. 2016. Vol. 24, Ed. 3. Pp. 29–34.
16. Karlinski J., Rusinski E., Smolnicki T. Protective structures for construction and mining machine operators // *Automation in construction*. 2008. Vol. 17, Ed. 3. Pp. 232–244.
17. Kushwaha D.K., Kane P.V. Ergonomic assessment and workstation design of shipping crane cabin in steel industry // *International journal of industrial ergonomics*. 2015. Vol. 52. Pp. 29–39.
18. Schutte P.C., Smith J.R. Practical ergonomics in mechanized mining // *Journal of the South African institute of mining and metallurgy*. 2002. Vol. 102, Ed.3. Pp. 145–149.
19. Vibration analysis on driver's seat of agricultural tractors during tillage tests / T. Gialamas, I. Gravalos, D. Kateris et al. // *Spanish journal of agricultural research*. 2016. Vol. 14, Ed. 4: e0210. DOI 10.5424/sjar/2016144-9664.
20. Виртуальные испытания – инструмент оценки безопасности конструкций АТС / М.С. Высоцкий, Е.А. Багаев, С.С. Баулин и др. // *Автомобильная промышленность*. 2011. № 2. С. 38–40.
21. Вьюшина М.Н., Жура В.П., Кривенко А.Е. Математическая модель человека в системе «Оператор – горная машина» // *Горн. информ.-аналит. бюл.* 1996. № 4. С. 91–93.
22. Журавлев А.В. Разработка математической модели несущей системы кабины с использованием современных систем инженерного анализа // *Международный научный журнал*. 2012. № 1. С. 89–91.
23. Журавлёв А.В., Козловская М.А. Результаты экспериментальных исследований несущего каркаса кабины опытного образца малогабаритного транспортного средства // *Международ. техн.-экон. журнал*. 2011. № 2. С. 128–133.
24. Зузов В.Н., Шабан Б. Совершенствование кабин грузовых автомобилей на стадии проектирования для удовлетворения требованиям пассивной безопасности // *Инженерный журнал: наука и инновации : электрон. журн.* 2013. № 12. URL: <http://engjournal.ru/articles/1130/1130.pdf> (Дата обращения 4.07.2022).
25. Красюков Н.Ф., Оганьян Э.С., Ноздрачева В.А. Моделирование нагруженности конструкции кабины машиниста при столкновении локомотива с препятствием // *Тяжелое машиностроение*. 2006. № 8. С. 34–35.
26. Красюков Н.Ф., Протопопов А.Л., Шашкова Е.В. Численное моделирование эксплуатационной нагруженности экипажных частей // *Вестн. науч.-исслед. и конструктор.-технолог. ин-та подвижного состава*. 2012. № 4. С. 104–113.
27. Методы определения ресурса и циклической прочности конструкций экипажной части локомотивов / Н.А. Махутов, В.А. Гапанович, В.С. Коссов и др. // *Транспорт: наука, техника, управление*. 2016. № 10. С. 3–12.
28. Дзоценидзе Т.Д., Козловская М.А., Загарин Д.А. Новый технический облик автомобилей и тракторов как способ преодоления кризисных явлений в отечественном машиностроении // *Автомобильная промышленность*. 2020. № 10. С. 13–18.
29. Результаты испытаний гусеничного трактора ВТ-155Д с новой верхней надстройкой / Т.Д. Дзоценидзе, О.В. Ульянов, М.А. Козловская // *Тракторы и сельхозмашины*. 2011. № 12. С. 7–9.
30. Шмелев А.В., Лисовский Э.В., Короткий В.С. Основы методики виртуального моделирования испытаний кабин грузовых автомобилей по требованиям пассивной безопасности // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2015. № 3 (32). С. 64–72.
31. Dzotsenidze T.D., Zagarin D.A., Kozlovskaya M.A. Use of profiled tubes to create three-dimensional frame-and-panel systems for tractors and automobiles // *Metallurgist*. 2014. Vol. 58, № 7-8. Pp. 717–723.
32. Mirzaamiri R., Esfahanian M., Ziaei-Rad S. Crash Test Simulation and Structure Improvement of IKCO 2624 Truck According to ECE-R29 Regulation // *International Journal of Automotive Engineering*. 2012. Vol. 2. № 3. Pp. 180–192. URL: <http://ijae.iust.ac.ir/article-1-145-en.pdf> (дата обращения 18.06.2022).

## References

1. Tarasov M.A. Modelirovanie parametrov funktsionirovaniya vyemochnoi mashiny s vibratsionnym vozdeistviem na gornye porody [Modeling of operating parameters of mining machines with vibration on the rocks]. *Ustoichivoe razvitiye gornykh territorii* [Sustainable development of mountain territories], 2019, vol. 11, no. 1(39), pp. 85–97.

2. Sednev V.A., Kopnyshev S.L., Sednev A.V. Issledovanie etapov protsessa i obosnovanie matematicheskoi modeli rasshirenii sfericheskoi polosti v gruntakh i gornyykh porodakh [Research of process stages and justification of mathematical model of spherical cavity expansion in soils and rocks]. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii* [Sustainable development of mountain territories], 2020, vol. 12, no. 2 (44), pp. 302–314.
3. Velikanov V.S., Usov I.G., Abdrakhmanov A.A., Usov I.I. Modelirovanie i optimizatsiya rezhimov raboty gornyykh mashin s ispolzovaniem sredy Matlab [Modeling and optimization of mining machine operation modes with MATLAB]. *Gornyi Zhurnal* [Mining magazine], 2017, no. 12, pp. 78–81.
4. Osintsev N.A. Upravleniia bezopasnostiu proizvodstva na rabochikh mestakh s primeneniem apparata teorii nechetkikh mnozhestv [Production safety management at workplaces using the apparatus of the theory of fuzzy sets]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov], 2008, no. 4 (24), pp. 83–85.
5. Velikanov V.S., Kozyr A.V., Dyorina N.V. Engineering implementation of view objectives in mine excavator design. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1592–1596.
6. Aromaa S., K. Vaananen Suitability of virtual prototypes to support human factors/ergonomics evaluation during the design. *Applied ergonomics*, 2016, vol. 56, pp. 11–18.
7. Chakraborty P.R., Bise C.J. A virtual-reality-based model for task-training of equipment operators in the mining industry. *Mineral resources engineering*, 2000, vol. 9, ed. 4, pp. 437–449.
8. Du Y., Dorneich M.C., Steward B. Virtual operator modeling method for excavator trenching. *Automation in construction*, 2016, vol. 70, pp. 14–25.
9. 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.
10. Tokarczyk J. Method for virtual prototyping of cabins of mining machines operators. *Archives of mining sciences*, 2015, vol. 60, ed.1, pp. 329–340.
11. Aromaa S., Goriachev V., Kymäläinen T. Virtual prototyping in the design of see-through features in mobile machinery. *Virtual Reality*, 2020, vol. 24, ed. 1, pp. 23–37. DOI 10.1007/s10055-019-00384-y.
12. Babaei H., Razeghi M., Choobineh A. et al. A new method for calculating saddle seat height with an emphasis on optimal posture based on trigonometric relations. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 2016, vol. 22, ed. 4, pp. 565–571.
13. Balaji K., Alphin M.S. Computer-aided human factors analysis of the industrial vehicle driver cabin to improve occupational health. *International journal of injury control and safety promotion*, 2014, vol. 23, ed. 3, pp. 240–248.
14. Lee D.H., Kim Y.J., Choi C.H. et al. Evaluation of operator visibility in three different cabins type Far-East combine harvesters. *International journal of agricultural and biological engineering*, 2016, vol. 9, ed. 4, pp. 33–44.
15. Horberry T., Burgess-Limerick R., Cooke T., Steiner L. Improving mining equipment safety through human-centered design. *Ergonomics in design: Quarterly of human factors applications*, 2016, vol. 24, ed. 3, pp. 29–34.
16. Karlinski J., Rusinski E., Smolnicki T. Protective structures for construction and mining machine operators. *Automation in construction*, 2008, vol. 17, ed. 3, pp. 232–244.
17. Kushwaha D.K., Kane P.V. Ergonomic assessment and workstation design of shipping crane cabin in steel industry. *International journal of industrial ergonomics*, 2015, vol. 52, pp. 29–39.
18. Schutte P.C., Smith J.R. Practical ergonomics in mechanized mining. *Journal of the South African institute of mining and metallurgy*, 2002, vol. 102, ed. 3, pp. 145–149.
19. Gialamas T., Gravalos I., Kateris D. et al. Vibration analysis on driver's seat of agricultural tractors during tillage tests. *Spanish journal of agricultural research*, 2016, vol. 14, ed. 4: e0210. DOI 10.5424/sjar/2016144-9664.
20. Vysotskii M.S., Bagaev E.A., Baulin S.S., Kovenya A.S., Kutsevolov V.A. Virtualnye ispytaniia – instrument otsenki bezopasnosti konstruksii ATS [Virtual Testing – Safety Assessment Tool for Vehicle Structures]. *Avtomobil'naya promyshlennost'* [Automotive industry], 2011, no. 2, pp. 38–40.
21. V'yushina M.N., Zhura V.P., Krivenko A.E. Matematicheskaiia model cheloveka v sisteme «Operator – gornaia mashina» [Mathematical model of a person in the "Operator – mining machine" system]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], 1996, no. 4, pp. 91–93.
22. Zhuravlev A.V. Razrabotka matematicheskoi modeli nesushchei sistemy kabiny s ispolzovaniem sovremennykh sistem inzhenernogo analiza [Mathematical model' of the carrier system of the cabin development using modern systems of engineering analysis]. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal* [International scientific journal], 2012, no. 1, pp. 89–91.
23. Zhuravlev A.V., Kozlovskaya M.A. Rezultaty eksperimentalnykh issledovaniy nesushchego karkasa kabiny opytного obraztsa malogabaritnogo transportnogo sredstva [The results of experimental studies of the cabin's supporting frame of the prototype of a small-sized vehicle]. *Mezhdunarodnyi tekhniko-ekonomicheskii zhurnal* [International technical and economic journal], 2011, no. 2, pp. 128–133.
24. Zuzov V.N., Shaban B. Sovershenstvovanie kabin gruzovykh avtomobilei na stadii proektirovaniia dlia udovletvoreniia trebovaniyam passivnoi bezopasnosti [Truck cabins improvement at the design stage to satisfy passive safety requirements]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 12. Available at: URL: <http://engjournal.ru/articles/1130/1130.pdf> (Accessed July 4, 2022).
25. Krasyukov N.F., Ogan'yan E.S., Nozdracheva V.A. Modelirovanie nagruzhenosti konstruksii kabiny mashinista pri stolknoveniin lokomotiva s prepiatstviem [Modeling the loading of the driver's cabin structure when a locomotive collides with an obstacle]. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy engineering], 2006, no. 8, pp. 34–35.
26. Krasyukov N.F., Protopopov A.L., Shashkova E.V. Chislennoe modelirovanie ekspluatatsionnoi nagruzhenosti ekipazhnykh chastei [Numerical modeling of the operational loading of the carriage parts]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo i kon-*

*struktorsko-tehnologicheskogo instituta podvizhnogo sostava* [Bulletin of the Research and Design Technological Institute of Rolling Stock], 2012, vol. 94, pp. 104–113.

27. Makhutov N.A., Gapanovich V.A., Kossov V.S., Ogan'yan E.S., Krasyukov N.F., Volokhov G.M. Metody opredeleniia resursa i tsiklicheskoï prochnosti konstruktivnoï ekipazhnoi chasti lokomotivov [Methods for determining the resource and cyclic strength of structures of the locomotives' undercarriage]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: science, equipment, management], 2016, no. 10, pp. 3–12.

28. Dzotsenidze T.D., Kozlovskaya M.A., Zagarin D.A. Novyi tekhnicheskii oblik avtomobilei i traktorov kak sposob preodoleniya krizisnykh yavlenii v otechestvennom mashinostroenii [The new technical appearance of cars and tractors as a way to overcome the crisis in the native mechanical engineering sphere]. *Avtomobil'naya promyshlennost'* [Automotive industry], 2020, no. 10, pp. 13–18.

29. Dzotsenidze T.D., Ul'yanov O.V., Kozlovskaya M.A., Il'in V.M. Rezultaty ispytaniï gusenichnogo traktora VT-155D s novoi verkhnei nadstroikoi [Test results of the VT-155D tracked tractor with a new upper superstructure]. *Traktory i sel'khoz-mashiny* [Tractors and agricultural machinery], 2011, no. 12, pp. 7–9.

30. Shmelev A.V., Lisovskii E.V., Korotkii V.S. Osnovy metodiki virtualnogo modelirovaniya ispytaniï kabin gruzovykh avtomobilei po trebovaniyam passivnoi bezopasnosti [Fundamentals of the methodology for virtual simulation of trucks' testing cabins according to passive safety requirements]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2015, no. 3(32), pp. 64–72.

31. Dzotsenidze T.D., Zagarin D.A., Kozlovskaya M.A. Use of profiled tubes to create three-dimensional frame-and-panel systems for tractors and automobiles. *Metallurgist*, 2014, vol. 58, no. 7-8, pp. 717–723.

32. Mirzaamiri R., Esfahanian M., Ziaei-Rad S. Crash Test Simulation and Structure Improvement of IKCO 2624 Truck According to ECE-R29 Regulation. *International Journal of Automotive Engineering*, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 180–192. URL: <http://ijae.iust.ac.ir/article-1-145-en.pdf> (Accessed June 18, 2022).

### Информация об авторах

**Великанов Владимир Семенович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и роботов, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; e-mail: rzhik\_00@mail.ru.

**Ильина Елена Александровна**, кандидат педагогических наук, доцент кафедры вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, e-mail: dar\_nas@mail.ru.

**Кочержинская Юлия Витальевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, e-mail: y.kocherzhinskaya@mail.ru.

### Information about the authors

**Vladimir S. Velikanov**, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Lifting and transport machines and robots, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg; e-mail: rzhik\_00@mail.ru.

**Elena A. Ilina**, PhD in Educational Science, Associate Professor of Department of Computer Science and Programming, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk; e-mail: dar\_nas@mail.ru.

**Yulia V. Kocherzhinskaya**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of Department of Computer Science and Programming, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk; e-mail: y.kocherzhinskaya@mail.ru.