

Оценка конструкции козырька самосвала посредством виртуального испытания FOPS в CAE Fidesys

Д.М. Дубинкин¹✉, А.В. Ялышев¹, М.А. Соннов²

¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация

² ООО «Фидесис», г. Москва, Российская Федерация

✉ ddm.tm@kuzstu.ru

Резюме: В исследовании оценивается прочность конструкции козырька при ударном воздействии путём оценки величины остаточной деформации. Оценка основана на испытаниях FOPS (ГОСТ ISO 3449–2014). Традиционные методы предполагают испытания полноразмерных прототипов, которые после ударов деформируются, что делает их непригодными для дальнейшего использования и увеличивает затраты. Необходимость создания отдельных образцов для каждого теста замедляет процесс разработки, подчёркивая актуальность внедрения альтернативных методов, таких как виртуальное моделирование. В статье представлены виртуальные испытания козырька карьерного самосвала на соответствие требованиям FOPS с использованием отечественной CAE-платформы Fidesys. Разработана модель козырька для виртуальных испытаний. Проведены испытания на соответствие требованиям стандарта на основе данных напряжений и величин пластических деформаций. Полученные данные дают возможность оптимизации параметров конструкции козырька для снижения массы без потери защитных свойств. Исследование подтверждает возможность применения конечно-элементного анализа для оценки соответствия требованиям FOPS на этапе проектирования. Предложено развитие метода испытаний с учётом особенностей эксплуатации карьерных самосвалов.

Fidesys: виртуальное моделирование, численное моделирование; карьерный самосвал, FOPS, грузовая платформа

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению от 30.09.2022 г. №075-15-2022-1198 с ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» (КНТП «Чистый уголь – Зеленый Кузбасс»), утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 мая 2022 г. №1144-р в рамках реализации мероприятия «Разработка и создание беспилотного карьерного самосвала челночного типа грузоподъемностью 220 тонн» в части выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Для цитирования: Дубинкин Д.М., Ялышев А.В., Соннов М.А. Оценка конструкции козырька самосвала посредством виртуального испытания FOPS в CAE Fidesys. *Горная промышленность*. 2025;(5):64–68. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-64-68>

Evaluation of dump truck canopy design using virtual FOPS testing in CAE Fidesys

D.M. Dubinkin¹✉, A.V. Yalyshev¹, M.A. Sonnov²

¹ Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, Russian Federation

² Fidesis LLC, Moscow, Russian Federation

✉ ddm.tm@kuzstu.ru

Abstract: The paper evaluates the impact strength of a canopy structure by assessing the amount of residual deformation. The assessment is based on FOPS testing (ISO 3449-2014). The traditional methods involve testing of the full-size prototypes, which get deformed after the impacts, making them unsuitable for further use thus increasing the testing costs. The need to create individual samples for each test slows down the development process, emphasizing the relevance of introducing alternative methods such as virtual modeling. The paper presents virtual tests of canopies of mining dump trucks for compliance with the FOPS requirements using the Fidesys CAE platform developed in Russia. A canopy model has been developed for the virtual tests. The tests have been carried out for compliance with the standard requirements based on the stress data and the plastic deformation values. The data obtained make it possible to optimize the canopy design parameters to reduce its weight without compromising the protective properties. The work confirms the possibility of using finite element analysis to assess compliance with the FOPS requirements at the design stage. It is proposed to develop a testing method that would take into account the specific features of the mining dump trucks operation.

Keywords: Fidesys, virtual modeling, numerical modeling, mining dump truck, FOPS, cargo platform

Acknowledgements: The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the agreement dated 30.09.2022 № 075-15-2022-1198 with the Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev's "Comprehensive scientific and technical program for a full innovation cycle "Development and implementation of a complex of technologies in the fields of exploration and extraction of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new products of deep processing from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to the life of the population" (CSTP "Clean coal – Green Kuzbass") approved by the decree of the Government of the Russian Federation dated May 11, 2022. No. 1144-r within the framework of the event "Development and creation of an unmanned shuttle-type mining dump truck with a lifting capacity of 220 tons" in terms of research and development work.

For citation: Dubinkin D.M., Yalyshev A.V., Sonnov M.A. Evaluation of dump truck canopy design using virtual FOPS testing in CAE Fidesys. *Russian Mining Industry*. 2025;(5):64–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-64-68>

Введение

В условиях высокой конкуренции на рынке горной техники скорость вывода новых продуктов приобретает стратегическое значение [1; 2]. При разработке новых конструкций требуется соблюдение ряда обоснованных требований, сложившихся в горном деле. Современные требования к защитным конструкциям горных машин, в том числе и карьерных самосвалов (КС), включают испытания FOPS (Falling Object Protective Structure), регламентируемые требованиями ГОСТ ISO 3449–2014¹. Под FOPS подразумевается некая конструкция, обеспечивающая защиту оператора от падающих предметов. Испытания позволяют оценить способность защитных конструкций, в рассматриваемом случае – козырька грузовой платформы (ГП) КС [3], выдержит ли он ударные нагрузки от падающих предметов при сохранении достаточной геометрической целостности. Данный стандарт может быть применим и к другим горным машинам, работающим в различных горно-геологических условиях.

Традиционные методы проверки соответствия требованиям испытаний FOPS требуют изготовления полно-размерных прототипов, подвергаемых удару падающими предметами, что зачастую приводит к значительным деформациям. В таких случаях испытания приводят к разрушению конструкции что делает невозможным её дальнейшее использование. Реализация подобных испытаний в натуре требует создания отдельных испытательных прототипов, в случае грузовой платформы – отдельного козырька.

Ввиду этого натурные испытания могут быть весьма экономически и трудозатратны. Для того чтобы решить эту проблему и сократить затраты на испытания, предлагается использовать виртуальные испытания электронной модели. В отличие от натурных виртуальные испытания не требуют создания реального прототипа. Согласно ГОСТ Р 57412–2014 виртуальные испытания определяются как численное моделирование, воспроизводящее реальные физические процессы на основе численных математических моделей и методов конечно-элементного анализа². Виртуальные испытания зарекомендовали себя и являются довольно распространёнными в автомобилестроении и горном машиностроении [4–6].

Виртуальные испытания позволяют не только избежать разрушения прототипа, но и совершать многократные тесты с различными параметрами, оптимизируя конструкцию на ранних этапах проектирования [7]. Исходя из этого

проведение виртуальных испытаний является обоснованным, так как позволяет снизить стоимость разработки и улучшить её характеристики.

Цель данной работы – провести виртуальные испытания FOPS конструкции козырька карьерного самосвала. Для оценки конструкции козырька самосвала посредством виртуальных испытаний необходимо:

1. Разработать модель козырька на основе граничных условий.
2. Сформировать расчётные случаи.
3. Разработать виртуальную модель на основе стандарта испытаний.
4. Проанализировать результаты и составить критерии для оценки конструкций козырька.

Методы

Для проведения виртуальных испытаний требуется специальное программное обеспечение, моделирующее некоторые физические процессы на основе численных математических моделей, например, на основе конечно-элементного анализа. В качестве такого обеспечения использовалась отечественная CAE платформа Fidesys [8; 9].

Геометрия козырька сформирована для моделирования на основе ее конструктивных особенностей и методики проведения испытаний FOPS.

Методика предусматривает определение проникновения элементов FOPS в объем ограничения деформации (DVL). В общем случае под объемом ограничения подразумевается геометрический объем, соответствующий антропометрическим данным оператора. В данной работе предлагается расширить этот объем с учётом специфики работы карьерного самосвала [10], включив в DVL кабину целиком, а также необходимое для функционирования оборудования, находящееся на палубе (шкафы управления, система питания воздухом и т.п.). Чтобы наверняка исключить проникновение козырька в ограничивающие зоны в процессе эксплуатации, примем зону безопасности 100 мм как ограничивающую для поверхности козырька. Таким образом, в общем случае конструкция козырька имеет следующий вид (рис. 1).

Основание козырька и его задняя стенка ограничены геометрией платформы карьерного самосвала, сама же поверхность козырька должна закрывать кабину и оборудование, находящееся на палубе, для того чтобы поддерживать поверхность козырька от провисания, предусмотрены ребра жёсткости. Общие ограничения по габаритам, ограничения по поверхностям индивидуальны для каждого КС. На основе общей конструкции и вышеописанных граничных зон была сформирована конструктивная схема козырька самосвала для виртуальных испытаний.

¹ ГОСТ ISO 3449–2014. Машины землеройные. Экскаваторы гидравлические. Лабораторные испытания и требования к характеристикам щитков для защиты оператора. Введ. 01.12.2021. М.: Стандартинформ, 2021. 13 с.

² ГОСТ Р 57412–2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2018.

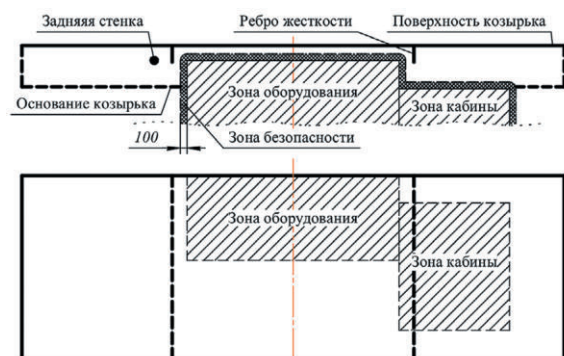


Рис. 1
Схема козырька

Fig. 1
Canopy layout

Расчётные случаи

Согласно ГОСТ ISO 3449–2014 место удара стандартного предмета для каждой площади выбирается таким образом, чтобы вызвать наибольшую деформацию сверху, частично сверху или тангенциально на верхней горизонтальной проекции с наименее возможным расстоянием от центра и вне площади любого конструктивного элемента, под конструктивными элементами в нашем случае понимаются передняя стенка и ребра жёсткости. Исходя из этих требований определены места удара, которые отмечены на рис. 2.

Длина $L = 4$ м, на схеме также показаны места удара стандартным объектом.

Козырёк как FOPS должен обеспечивать защиту от стандартного предмета цилиндрической формы, имеющего энергию не менее 11600 Дж. Энергию падающего тела можно вычислить по формуле

$$E = \frac{mv^2}{2},$$

где v – скорость стандартного предмета перед ударом; m – масса стандартного предмета.

Масса стандартного предмета задаётся стандартом и равна 227 кг. Отсюда скорость v стандартного предмета должна быть не менее 10,1 м/с перед ударом о поверхность козырька.

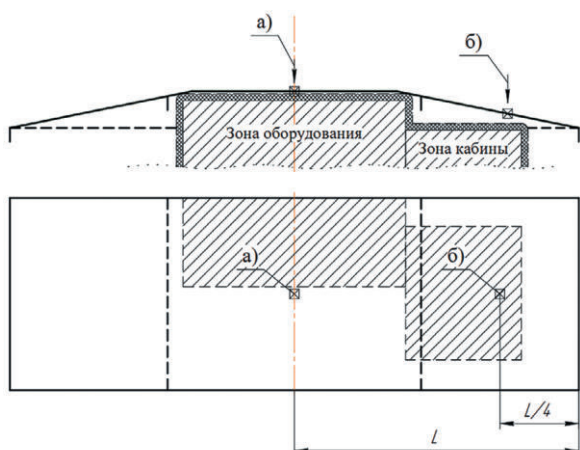


Рис. 2
Конструктивная схема козырька трапецевидной формы: а – удар по центру над оборудованием; б – удар по краю над кабиной

Fig. 2
Structural layout of a trapezoidal canopy: а – impact point in the center above the equipment; б – impact point at the edge above the cabin

Виртуальная модель

Виртуальная модель козырька была сформирована на основе ранее полученных конструктивных схем. Толщина конструктивных элементов козырька принята 6 мм. Геометрия была разбита на объёмную сетку с целевым размером – 50 мм (рис. 3).

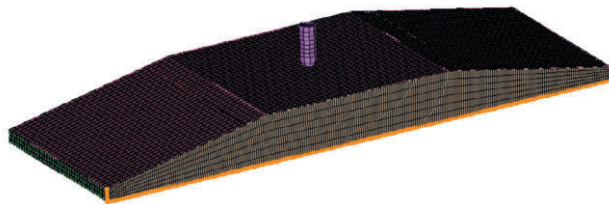


Рис. 3
Виртуальная модель козырька

Fig. 3
A virtual model of the canopy

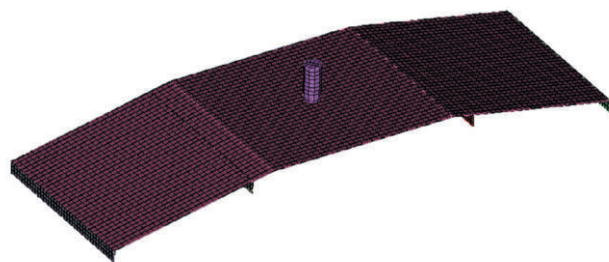


Рис. 4
Ограничения перемещения

Fig. 4
Displacement constraints

В качестве материала и стандартного предмета взята сталь из библиотеки Fidesys 10XCHД. Ограничения по перемещению для козырька заданы в виде заделки по внешним краям передней стенки (рис. 4).

Обозначены контактирующие поверхности, верхняя грань козырька и нижняя грань стандартного предмета. Контакт общий MPC с коэффициентом трения 0,3.

Начальные условия моделирования – скорость, заданная стандартному предмету, равна 10,1 м/с. Сила тяжести 9,81 м/с.

Решение выполнялось с учётом пластичности материала по неявной схеме ввиду особенности решателя, целевой интервал шага в 0,01 с может немного отличаться по времени.

Результаты

Рассмотрим процесс соударения для общего понимания процесса деформации козырька, используя постпроцессор FidesysViewer. Полученный результат представим в виде кинограммы (табл. 1).

Время, за которое стандартный объект передаёт основную часть кинетической энергии, 0,04 с, оно же примерно совпадает с максимальными перемещениями. Приведём результаты напряжённо-деформированного состояния в момент удара стандартным объектом по козырьку в момент наибольших перемещений (рис. 5).

Так как CAE Fidesys является безразмерным решателем, на изображениях не указана размерность. Чтобы оценить численные показатели конструкции, приведём значения напряжений в момент максимальных значений перемещений (max) и остаточных деформаций, полученных в результате моделирования, в табл. 2.

Согласно заданной расчётной модели максимальные значения перемещений для козырька составили 69 мм, что находится в зоне безопасных <100 мм перемещений. Большие напряжения, возникающие в начале удара, имеют локальное распределение и сосредоточены непосредственно в момент удара.

Таблица 1
Значения
напряженно-
деформированного
состояния в
моделях козырька

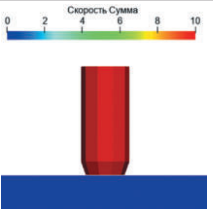
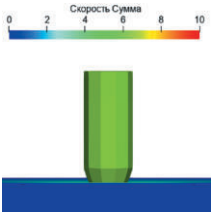
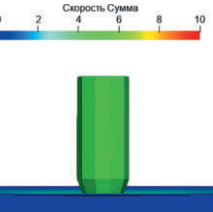
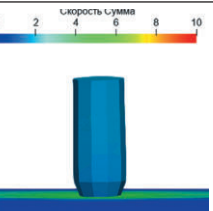
Время, с	Скорость стандартного объекта
0	
0,0125	
0,025	
0,04	

Table 1
The stress-strain
state values in
the canopy
models

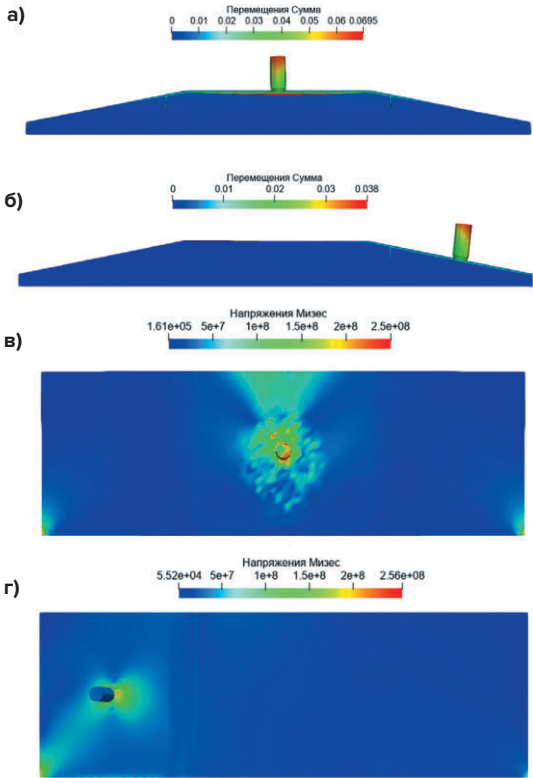


Рис. 5
Картина напряженно-
деформированного
состояния:
а – удар по центру
перемещения;
б – удар по центру
напряжения;
в – удар по краю
перемещения;
г – удар по краю
напряжения

Fig. 5
Visualization
of the stress-strain state:
а – impact point in the center,
displacement;
б – impact point in the center,
stress;
в – impact point at the edge,
displacement;
г – impact point at the edge,
stress

Таблица 2
Значения напряженно-деформированного
состояния в моделях козырька

Место удара	Перемещение козырька max, мм	Напряжение, МПа	Пластическая деформация, мм/мм
Центр	69	260	~0,00092%
Край	30	256	~0,0009%

Table 2
Values of the stress-strain state in the
canopy models

ственно в зоне удара, вызывая пластические деформации до 0,001%.

По результатам моделирования представленная в расчёте конструкция козырька способна обеспечить безопасность при ударе стандартным предметом. Дальнейшая оптимизация может быть направлена на уменьшение толщины поверхности козырька с целью снижения увеличения грузоподъёмности платформы [11].

Заключение

Таким образом, виртуальные испытания FOPS дают основания для оценки конструкции и возможность снизить затраты на проведение испытаний. Виртуальные испытания в CAE Fidesys могут быть эффективной альтернативой традиционным натурным испытаниям, позволяя оценить большее количество вариантов конструкции с меньшим количеством затрат на разработку. Возможность получения таких результатов позволяет оптимизировать конструкцию на ранних стадиях разработки.

Помимо этого, виртуальные испытания могут быть намного более вариативными для постановки расчётных задач, так как реальная практика эксплуатации может отличаться от расчётных случаев ввиду большей массы кусков породы и их заострённой формы (рис. 6).



Рис. 6
Кусок породы, лежащий
на палубе CAT 794
после разрушения защитного
козырька

Fig. 6
A piece of rock on the deck
of the CAT 794 after the
protective canopy destruction

Поэтому стоит отметить, что испытания FOPS по ГОСТ ISO 3449–2014 можно назвать достаточно щадящими в контексте козырьков грузовых платформ и их реальных условий эксплуатации. Но развитие и расширение данной методики испытаний с учётом специфики эксплуатации карьерной техники поможет сделать её эксплуатацию более безопасной.

Список литературы / References

1. Ялышев А.В. Необходимость создания грузовой платформы для аккумуляторного карьерного самосвала. В кн.: Дубинкин Д.М. (ред.) *Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: сб. материалов 6-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Кемерово, 30 нояб.–1 дек. 2022 г.* Кемерово: КузГТУ; 2022. С. 706–710.
2. Dubinkin D. Design development of autonomous mining dump trucks. *E3S Web of Conferences*. 2023;402:10022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340210022>
3. Дубинкин Д.М., Ялышев А.В. Подход к формированию геометрии продольного сечения грузовой платформы. В кн.: Хорешок А.А. (ред.) *Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2022: сб. материалов 19-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Кемерово, 23–24 нояб. 2022 г.* Кемерово: КузГТУ; 2022. С. 407.1–407.7.
4. 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):64–72. Режим доступа: <https://www.mmmm.by/ru/readers/archive-room?layout=edit&id=624> (дата обращения: 18.03.2025).
Shmelev A.V., Lisovski E.V., Korotki V.S. Basics of the computer simulation procedure for commercial vehicle cab passive safety testing. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2015;(3):64–72. (In Russ.) Available at: <https://www.mmmm.by/ru/readers/archive-room?layout=edit&id=624> (accessed: 18.03.2025).
5. Karliński J., Rusiński E., Smolnicki T. Protective structures for construction and mining machine operators. *Automation in Construction*. 2008;17(3):232–244. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2007.05.008>
6. Gomathinayagam A., Stephen P.A., Babu S., Keshava K. Simulation of falling object protective structure testing of earth moving equipment cabin. In: Chakrabarti A. (ed.) *Research into Design for a Connected World. Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol 134. Singapore: Springer; 2019, pp. 203–213. https://doi.org/10.1007/978-981-13-5974-3_18
7. Высоцкий М.С., Багаев Е.А., Баулин С.С., Ковеня А.С., Куцеволов В.А. Виртуальные испытания – инструмент оценки безопасности конструкций АТС. *Автомобильная промышленность*. 2011;(2):38–40.
Vysotsky M.S., Bagaev E.A., Baulin S.S., Kovenya A.S., Kutsevolov V.A. Virtual testing - a tool to assess the safety of vehicles. *Avtomobilnaya Promyshlennost*. 2011;(2):38–40. (In Russ.)
8. Решетников Д.С., Сабирова М.А., Ахатов М.А. Обзор программного обеспечения для расчета пластической деформации металлических материалов методами ОМД. В кн.: *Быстрозакаленные материалы и покрытия: материалы 20-й Междунар. науч.-техн. конф., г. Москва, 17–18 окт. 2023 г.* М.: Пробел-2000; 2023. С. 322–333.
9. Левин В.А. Реализация моделей поэтапного нагружения тел при конечных деформациях в промышленном пакете «Фидесис». В кн.: *12-й Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, г. Уфа, 19–24 авг. 2019 г.* Уфа: БашГУ; 2019. Т. 3. С. 127–129.
10. Ялышев А.В., Дубинкин Д.М. Обзор эксплуатируемых кузовов карьерных самосвалов с задней разгрузкой. В кн.: *Россия молодая: сб. материалов 13-й Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, г. Кемерово, 20–23 апр. 2021 г.* Кемерово: КузГТУ; 2021. С. 10308.1–10308.8.
11. Дубинкин Д.М., Ялышев А.В., Исмаилова Ш.Я. Тенденции развития грузовых платформ карьерных самосвалов. *Горная промышленность*. 2023;(3):72–76. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-72-76>
Dubinkin D.M., Yalyshev A.V., Ismailova Sh.Ya. Trends in the development of unmanned mining dump trucks. *Russian Mining Industry*. 2023;(3):72–76. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-72-76>

Информация об авторах

Дубинкин Дмитрий Михайлович – кандидат технических наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-8193-9794>; e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Ялышев Алексей Витальевич – младший научный сотрудник научного центра цифровых технологий, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: yalyshevav@kuzstu.ru

Соннов Максим Александрович – действительный член Академии горных наук, заместитель генерального директора ООО «Фидесис», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0004-3932-5571>, sonnov@cae-fidesys.com

Information about the authors

Dmitry M. Dubinkin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-8193-9794>; e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Aleksey V. Yalyshev – Junior Researcher Associate, Research Center of Digital Technologies, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: yalyshevav@kuzstu.ru

Maxim A. Sonnov – Full Member of the Academy of Mining Sciences, Deputy General Director of Fidesys LLC, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0004-3932-5571>; e-mail: sonnov@cae-fidesys.com

Article info

Received: 29.05.2025

Revised: 10.07.2025

Accepted: 22.07.2025

Информация о статье

Поступила в редакцию: 29.05.2025

Поступила после рецензирования: 10.07.2025

Принята к публикации: 22.07.2025