

Влияние водоотталкивающего покрытия на работоспособность конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях экстремально низких температур

Б.С. Ермаков¹, О.В. Швецов¹, С.А. Вологжанина²✉, Д.В. Нечаев¹, И.Д. Карпов¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ svet_spb@mail.ru

Резюме: Проведен анализ влияния водоотталкивающего покрытия на работоспособность конструкций, используемых в горной промышленности, из полимерных композиционных материалов в зоне арктики и субарктики. Изучено влияние на механические свойства образцов длительного воздействия низких климатических температур, влагопоглощения, «перехода через ноль», воздействия соляного тумана, а также комплексное влияние перечисленных факторов. В качестве защитного покрытия использовался водоотталкивающий лак ЭП-730, наносимый методом напыления. Установлено, что в ходе длительной эксплуатации изделий из полимерных композиционных материалов в северных регионах России следует обращать особое внимание на возможную деградацию их механических свойств под воздействием различных климатических факторов. К числу наиболее значимых факторов риска относятся переходы температуры внешней среды через ноль и влажную морскую среду. Совместное воздействие нескольких климатических факторов также оказывает дополнительное усиливающее воздействие на деградацию механических свойств материалов и снижает надежность и долговечность оборудования. Полученные результаты подчеркивают необходимость применения водоотталкивающих покрытий для повышения надежности и долговечности конструкций из полимерных композиционных материалов, эксплуатируемых в северных регионах.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, водоотталкивающее покрытие, экстремально низкие температуры, морской климат, механические свойства материалов

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №FSEG-2024-0009 Разработка моделей деградации служебных свойств металлических и композиционных материалов для строительства в условиях многолетнемерзлых грунтов).

Для цитирования: Ермаков Б.С., Швецов О.В., Вологжанина С.А., Нечаев Д.В., Карпов И.Д. Влияние водоотталкивающего покрытия на работоспособность конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях экстремально низких температур. *Горная промышленность*. 2024;(5S):198–203. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-198-203>

The influence of water-repellent coating on the performance of structures made of polymer composite materials in conditions of extremely low temperatures

B.S. Ermakov¹, O.V. Shvetsov¹, S.A. Vologzhanina^{1,2}✉, D.V. Nechaev¹, I.D. Karpov¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Politechnik University, Saint Petersburg, Russian Federation

² Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ svet_spb@mail.ru

Abstract: An analysis was carried out of the influence of a water-repellent coating on the performance of structures made of polymer composite materials in the Arctic and Subarctic zones. The influence of long-term exposure to the low temperatures, moisture absorption, “zero crossing,” exposure to the salt fog on the mechanical properties of samples was studied as well as the complex influence of these factors. The EP-730 water-repellent varnish, applied by spraying, was used as the protective coating. It has been established that in the course of long-term operation of products made of polymer composite materials in the northern regions of Russia it is necessary to pay special attention to possible degradation of their mechanical properties under the impact of various climatic factors. The most significant risk factors include the zero crossings of the ambient temperature and the humid marine environment. The combined action of several climatic factors also produces an additional amplifying effect on

the degradation of mechanical properties of the materials and reduces the reliability and lifetime of the equipment. The results obtained highlight the need to use the water-repellent coatings to improve the reliability and durability of the structures made of polymer composite material used in the northern regions.

Keywords: polymer composite materials, water-repellent coating, extremely low temperatures, maritime climate, mechanical properties

Acknowledgments: The study was carried out within the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Topic No. FSEG-2024-0009 'Development of degradation models of service properties for metallic and composite civil construction materials in conditions of permafrost soils').

For citation: Ermakov B.S., Shvetsov O.V., Vologzhanina S.A., Nechaev D.V., Karpov I.D. The influence of water-repellent coating on the performance of structures made of polymer composite materials in conditions of extremely low temperatures. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):198–203. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-198-203>

Введение

Использование защитных покрытий для горной промышленности арктической и субарктической зоны России является не просто актуальным, а жизненно необходимым. Экстремальные условия этих регионов, характеризующиеся низкими температурами, сильными ветрами, обильными осадками и вечной мерзлотой, создают огромные вызовы для горнодобывающих предприятий [1–3]. Металлические конструкции, оборудование и инфраструктура подвергаются интенсивному износу и коррозии, что приводит к повышенным затратам на ремонт и содержание, а также к риску аварий и простоев [4–6].

Защитные покрытия играют ключевую роль в обеспечении долговечности и безопасности горных работ в арктических и субарктических условиях. Они предотвращают коррозию, износ и ухудшение свойств материалов, повышая их стойкость к неблагоприятным факторам окружающей среды. Особое внимание уделяется защитным покрытиям с улучшенными свойствами морозостойкости, водонепроницаемости и устойчивости к абразивному износу. Важно также учитывать экологическую безопасность и устойчивость применяемых материалов, чтобы минимизировать их влияние на хрупкую арктическую экосистему [3; 7; 8].

Особое внимание защитным покрытиям полимерных композиционных материалов (ПКМ) уделяется в условиях эксплуатации в приморских зонах арктического и субарктического регионов, что связано с рядом климатических особенностей этих регионов [9–11], способных значительно снизить надежность и долговечность оборудования из ПКМ [12–14]. К таким климатическим факторам относятся влажный, в том числе морской воздух, и циклические изменения температуры наружного воздуха в весенний и осенний периоды – так называемые «переходы через ноль». Число таких переходов в северо-восточных регионах страны может достигать и даже превышать 50 в год [12–14]. Насыщение влагой и другими химическими веществами ПКМ может происходить по одному из двух механизмов или совместном воздействии на материал этих механизмов – это растворение вещества в ПКМ [15–17] и его диффузия через ПКМ [18–20]. Под растворением подразумевается процесс поглощения воды полимерной матрицей, интенсивность протекания такого процесса напрямую зависит от энергии взаимодействия полимера и поглощаемых молекул воды [21–23], незащищенной поверхности материала [24–26] и объема поглощаемой жидкости. Скорость диффузии жидкости в ПКМ зависит от свойств тканого материала ПКМ [27–29], в том числе ориентации его волокон [30], причем количество диффундирующей жидкости определяется капиллярным эффектом, действующим вдоль волокон тканого материала или по дефектам в границах раздела ткани и смолы [31–32], возникновение которых обычно

объясняется усадкой смолы во время отверждения термоактивной основы.

Цель данной работы – определить влияние климатических факторов на механические свойства композиционных полимерных материалов и оценить возможность снижения влияния этих факторов путем защиты ПКМ водоотталкивающими покрытиями.

Материалы и методы

Для проведения исследований влияния низких климатических температур и «влажных» климатических факторов на деградацию свойств ПКМ методом вакуумной инфузии были изготовлены пластины ПКМ с тремя слоями тканого наполнителя, из которых затем были вырезаны образцы для статических механических испытаний по ГОСТ 56785–2015 и ударной вязкости по Шарпи ГОСТ 4647–2015. Метод вакуумной инфузии позволяет минимизировать число технологических дефектов при производстве и обеспечить достаточно равномерное распределение смолы по объему пластин. В качестве защитного покрытия был использован водоотталкивающий лак ЭП-730. Защитное покрытие наносилось на наружную поверхность испытуемых образцов напылением. После изготовления образцы были разделены на две группы. Поверхность образцов первой группы была полностью защищена водоотталкивающим покрытием, у образцов второй группы боковые стороны рабочей части образцов оставались незащищенными. Дополнительно были изготовлены образцы для исследования интенсивности влагопоглощения по ГОСТ Р 56762–2015. Все образцы были выдержаны в воде в течение 100 ч, а затем испытаны после двух типов климатических воздействий. В первом случае было исследовано воздействие низких температур и переходов через ноль, во втором – низких температур и соляного тумана. Образцы помещали в климатическую камеру, охлажденную до минус 60 °С (время выдержки 100 ч), затем часть образцов подвергались 10 переходам через ноль, а часть помещалась в камеру соляного тумана (время выдержки 10 ч).

Результаты и их обсуждение

Известно, что все ПКМ, в том числе стекло- и углепластики, способны к влагопоглощению, причем вода в наибольшей степени будет оказывать влияние на структуру и свойства смолы вблизи поверхностей раздела основы и наполнителя. Диффузия воды, направленная к гидрофильным примесям смолы, приводит к образованию различного типа дефектов – трещин, пор, расслоениям, разрыву нитей тканого материала и, как следствие, нарушениям его целостности, особо интенсивным при пониженных климатических температурах (рис. 1).

Показано, что после пребывания в жидкости в течение

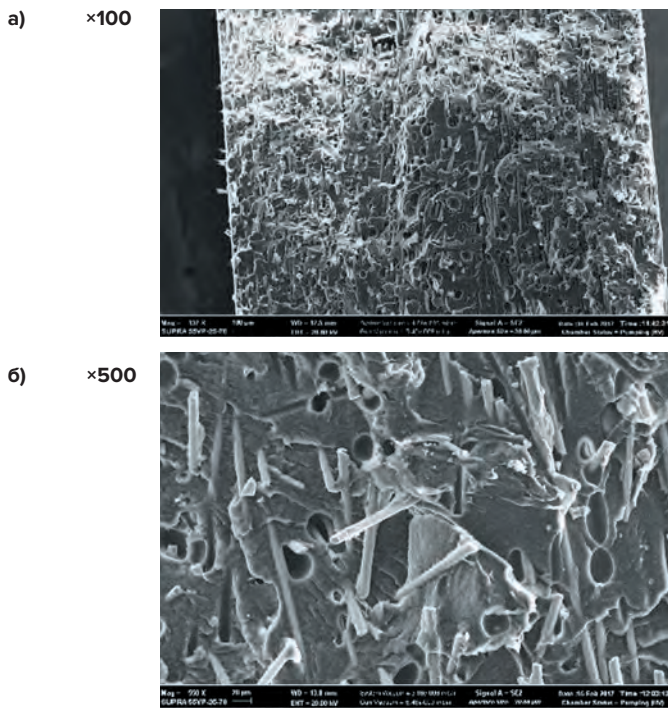


Рис. 1
Поверхность образца стеклопластика:
а – дефекты, образовавшиеся в местах скопления воды в поверхностном слое образцов после выдержки в дистиллированной воде при 20 °С, 1000 ч; б – после 150 циклов переходов через ноль

Fig. 1
Surface of a fiberglass sample:
a) defects formed in places where water accumulates in the surface layer of the samples after exposure to distilled water at 20 °С for 1000 h; b) after 150 zero-crossing cycles

24 ч прирост массы образцов стеклопластика составил около 0,11%, после 1000 ч – 0,37%, после 2500 ч – около 0,48%, что в целом соответствует данным, приведенным в ряде исследований [8, 9]. Такой уровень влагопоглощения должен приводить к снижению механических свойств ПКМ, особенно при пониженных температурах, что подтверждено результатами экспериментов. Однако такое снижение даже после выдержек образцов в воде в течение 2500 не привело к катастрофическому снижению свойств. На рис. 2 и в табл. 1 и 2 приведены данные о влиянии качества защитного покрытия на сопротивляемость ПКМ воздействию тепло-влажностного фактора и соляного тумана. При исследовании влияния циклов «перехода через ноль» образцы помещали в климатическую камеру (минус 60 °С), выдерживали при этой температуре в течение 150 мин, а затем разогревали на открытом воздухе при комнатной температуре также в течение 150 мин. Число перемещений образцов в климатическую камеру и на открытый воздух всего составило 150 циклов.

Как следует из полученных экспериментальных данных, переходы через ноль оказывают существенное влияние на прочностные свойства, пластичность и вязкость исследованных ПКМ. Установлено, что с увеличением числа циклов через ноль все механические свойства обоих ПКМ понижаются. Так, предел прочности стеклопластика после 100 переходов через ноль снизился на ~15%; углепластика – на ~9%. Дальнейшее увеличение циклов переходов до 150 приводит к монотонному снижению характеристик.

Наиболее вероятной причиной такого воздействия может быть накопление влаги в поверхностных порах образцов, образование кристаллов льда и появление внутренних

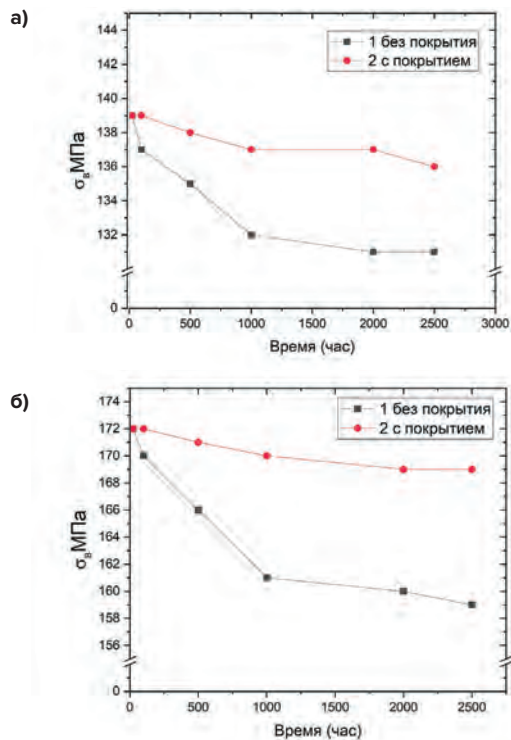


Рис. 2
Влияние времени пребывания в воде на прочность образцов стеклопластика (образцы без защитного покрытия – 1 и с покрытием – 2). Температура испытаний 20 °С (а) и при минус 60 °С (б).

Fig. 2
Effect of time spent in water on the strength of fiberglass samples (samples without protective coating – 1 and with coating – 2). The test temperatures of plus 20 °С (a) and minus 60 °С (b).

напряжений, разрушение полимерной матрицы с разрывом стеклянных или карбоновых нитей и образование в поверхностном слое пор, количество и величина которых растут с увеличением числа циклов переходов через ноль (рис. 2), вызванных различиями в плотности и объеме жидкой и кристаллической водяных фаз. Полученные результаты подтверждают важнейшую роль фактора «перехода через ноль» в надежности и долговечности ПКМ и хорошо согласуются с выводами, приведенными в работах [9; 10].

Защитное покрытие, нанесенное на боковые поверхности образцов, позволяет снизить влияние климатического – циклического фактора, однако полностью его не устраняет, что, вероятно, связано с появлением микроскопических дефектов в защитном слое, на поверхности которого уже после 100 циклов были обнаружены отслоения и трещины, видимые невооруженным глазом. Еще одним следствием перехода температуры воздуха через ноль является образование на поверхности изделий из ПКМ льда (иней) при температуре ниже нуля или росы – после таяния иней при повышении температуры. Результатами однократного намораживания слоя иней на поверхности образцов было показано, что образование льда (иней) и росы на поверхности испытываемых образцов не приводит к сколь-нибудь заметному изменению механических свойств ПКМ как при статическом, так и динамическом нагружении.

Учитывая, что значительное число новых объектов добывающих производств, в том числе – нефтегазового комплекса, расположены вблизи побережья Северного Ледовитого океана, были проведены исследования влияния на работоспособность ПКМ влажного морского климата, насыщенного солями. С этой целью были проведены испы-

тания механических свойств ПКМ после длительной выдержки образцов в камере соляного тумана. Показано, что пребывание в соляном тумане достаточно резко снижает весь комплекс механических свойств обоих ПКМ, однако, в отличие от термоциклирования, влияние соляного тумана на механические свойства ПКМ постепенно ослабевает. Влияние агрессивной среды при увеличении времени пребывания образцов в соляном тумане постепенно снижается, а после 20 дней (480 ч) пребывания в камере соляного тумана происходит стабилизация характеристик: предел прочности стеклопластика после первых 24 ч воздействия соляного тумана снизился на 17 МПа, а за 624 ч (с 96 по 720 ч) – всего на 5 МПа. Полученные результаты испытаний указывают, что наиболее значимыми факторами снижения механических свойств ПКМ в ходе их длительного пребывания в климатических условиях арктического и субарктического климатических поясов являются переходы через ноль, когда влага насыщает поверхностные дефекты (поры, несплошности, риски) на поверхности изделий с образованием кристаллических ледяных фаз в поверхностных слоях, зон с повышенными внутренними напряжениями и при воздействии влажного морского климата с повышенным содержанием соли. Для защиты ПКМ от действия этих факторов необходимо проводить обработку поверхности изделий гидрофобно-адгезионными составами, отталкивающими воду [11].

По результатам испытаний было показано, что совместное воздействие климатических факторов приводит к более резкому снижению прочностных свойств ПКМ, особенно при испытаниях в области отрицательных климатических температур. Так, предел прочности образцов, испытанных в условиях «охлаждение – переход через ноль», снизился – после одного цикла до 135 МПа при

20 °С и до 157 МПа при минус 60 °С, после пяти циклов – соответственно до 118 и 141 МПа, у образцов, испытанных только после воздействия фактора «переход через ноль» (50 циклов воздействия), эти величины составили – 127 и 147 МПа; результаты испытаний образцов в условиях «охлаждение – соляной туман» после одного цикла составили 125 и 155 МПа, а после пяти – 114 и 137 МПа, соответственно у образцов, испытанных только в условиях воздействия соляного тумана (50 ч), – 118 и 144 МПа.

Испытания образцов с защитными покрытиями боковых поверхностей также показали, что совместное воздействие климатических факторов приводит к более заметному снижению механических свойств стеклопластика по сравнению с отдельным влиянием отдельных климатических факторов, хотя это снижение значительно меньше, чем у образцов, боковая поверхность которых не была защищена отталкивающими воду покрытиями.

Заключение

Установлено, что в ходе длительной эксплуатации изделий из ПКМ в северных регионах страны следует обращать особое внимание на возможную деградацию их механических свойств под воздействием различных климатических факторов. К числу наиболее значимых факторов риска, снижающих надежность и долговечность оборудования из ПКМ, следует отнести переходы температуры внешней среды через ноль и влажную морскую среду. Также следует учитывать, что совместное воздействие нескольких климатических факторов может оказывать дополнительное усиливающее воздействие на деградацию их механических свойств, а следовательно, на снижение надежности и долговечности оборудования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Competing Interests

The authors declare that there is no conflict of interest.

Вклад авторов

Авторы заявляют о равноценном вкладе всех соавторов в работу.

Authors' contributions

The authors declare the equal contribution of all co-authors to the work.

Список литературы / References

1. Пряхин Е.И., Азаров В.А. Повышение адгезии фторопластовых покрытий к стальным поверхностям труб с перспективой их использования в газотранспортных системах. *Черные металлы*. 2024;(3):69–75. <https://doi.org/10.17580/chm.2024.03.11>
Pryakhin E.I., Azarov V.A. Increasing the adhesion of fluoroplastic coatings to steel surfaces of pipes with a view to their use in gas transmission systems. *Chernye Metally*. 2024;(3):69–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/chm.2024.03.11>
2. Череповицын А.Е., Цветков П.С., Евсеева О.О. Критический анализ методических подходов к оценке устойчивости арктических нефтегазовых проектов. *Записки Горного института*. 2021;249:463–478. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.15>
Cherepovitsyn A.E., Tsvetkov P.S., Evseeva O.O. Critical analysis of methodological approaches to assessing sustainability of arctic oil and gas projects. *Journal of Mining Institute*. 2021;249:463–478. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.15>
3. Suprun E., Tynchenko V., Khramkov V., Kovalev G., Soloveva T. The use of artificial intelligence to diagnose the disease. *BIO Web of Conferences*. 2024;84:01008. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248401008>
4. Пряхин Е.И., Прибыткова Д.А. Влияние качества подготовки поверхности труб для теплосетей на их коррозионную стойкость при эксплуатации в условиях подземного залегания. *Черные металлы*. 2023;(11):97–102. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.11.15>
Pryakhin E.I., Pribytkova D.A. The influence of the quality of surface preparation of pipes for heating networks on their corrosion resistance during operation in underground conditions. *Chernye Metally*. 2023;(11):97–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/chm.2023.11.15>

5. Tynchenko V.S., Stashkevich A., Muzyka P., Leontieva A.A., Degtyareva K.V. Effective energy management tools: inventory management and monitoring of energy consumption by personnel. *E3S Web of Conferences*. 2023;458:01011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345801011>
6. Sizyakov V.M., Bazhin V.Yu., Piirainen V.Yu., Sharikov F.Yu., Mas'ko O.N. Implementation of self-propagating low-temperature synthesis to produce pure silicon carbide. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2023;64(3):265–270. <https://doi.org/10.1007/s11148-024-00836-2>
7. Пириайнен В.Ю., Баринкова А.А. Разработка композиционных материалов на основе красного шлама. *Обогащение руд*. 2023;(3):35–41. <https://doi.org/10.17580/or.2023.03.06>
Piirainen V.Yu., Barinkova A.A. Development of composite materials based on red mud. *Obogashchenie Rud*. 2023;(3):35–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2023.03.06>
8. Chernykh N., Mikhalev A., Dmitriev V., Tynchenko V., Shutkina E. Comparative analysis of existing measures to reduce road accidents in Western Europe. In: *2023 22nd International Symposium INFOTEH-JAHORINA, INFOTEH, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 15-17 March. 2023*. IEEE; 2023, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/INFOTEH57020.2023.10094192>
9. Голик В.И., Кукарцев В.А., Панфилова Т.А., Тынченко В.С., Конюхов В.Ю. К механохимической активации процессов выщелачивания в дезинтеграторе. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(11-1):175–189. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_175
Golik V.I., Kukartsev V.A., Panfilova T.A., Tynchenko V.S., Konyukhov V.Yu. The mechanochemical activation of leaching processes in a disintegrator. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11-1):175–189. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_175
10. Golik V., Stas G., Morkun V., Morkun N., Gaponenko I. Study of rock structure properties during combined stopping and development headings. *E3S Web of Conferences*, 2020;166:03006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016603006>
11. Orlov V., Kukartsev V., Suprun E., Gek D., Ageev D. Designing an information system to automate service management at the enterprise. *E3S Web of Conferences*. 2023;458:09019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345809019>
12. Zubail A., Traidia A., Masulli M., Vatopoulos K., Villette T., Taie I. Carbon and energy footprint of nonmetallic composite pipes in onshore oil and gas flowlines. *Journal of Cleaner Production*. 2021;305:127150. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127150>
13. Тихонов А.С., Ковалев А.В. Анализ конструкций нефтяных и газовых скважин с целью выявления перспективных направлений дальнейших исследований. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022;333(3):126–143. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/3/3492>
Tikhonov A.S., Kovalev A.V. Analysis of oil and gas well casing designs in order to identify promising areas for further research. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(3):126–143. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/3/3492>
14. Orlov V., Tynchenko V., Nizameeva A., Shalaeva D., Ageev D. Development of a multifunctional cross-platform system for automation of energy data and resource management. *E3S Web of Conferences*. 2023;460:07002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346007002>
15. Kukartsev V.V., Kravtsov K.I., Suprun P.S., Gek D.K., Pinchuk I.A. Advancements in network-based management systems for enhanced business services. *E3S Web of Conferences*. 2023;460:07003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346007003>
16. Дубов Г.М., Дворовенко И.В., Азиханов С.С., Зырянов И.В., Логвинов И.А., Попов Д.К. Оптимизация эксплуатации газобаллонного оборудования технологического транспорта АК «АЛРОСА», использующего сжатый природный газ в качестве моторного топлива в условиях Якутии. *Горная промышленность*. 2024;(2):84–91. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-84-91>
Dubov G.M., Dvorovenko I.V., Azikhanov S.S., Zyryanov I.V., Logvinov I.A., Popov D.K. Optimisation of the gas cylinder equipment operation of ALROSA's compressed gas utility vehicles in conditions of Yakutia. *Russian Mining Industry*. 2024;(2):84–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-84-91>
17. Ardashkin I.B., Yakovlev A.N., Martyushev N.V. Evaluation of the resource efficiency of foundry technologies: Methodological aspect. *Advanced Materials Research*. 2014;1040:912–916. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.912>
18. Skeebe V., Ivancivsky V., Martyushev N.V., Lobanov D.V., Vakhrushev N.V., Zhigulev A.K. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating source. *Key Engineering Materials*. 2016;712:105–111. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105>
19. Агафонов В.В., Оганесян А.С., Соловых Д.Я., Козлова О.Ю. Влияние полипропиленового волокна на цементный закладочный композит на основе хвостов обогащения. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(4):1108–1118. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-4-1108-1118>
Agafonov V.V., Oganesyanyan A.S., Solovykh D.Ya., Kozlova O.Yu. Effect of polypropylene fiber on cement backfill based on tailings. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(4):1108–1118. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-4-1108-1118>
20. Alabtah F.G., Mahdi E., Eliyan F.F. The use of fiber reinforced polymeric composites in pipelines: A review. *Composite Structures*. 2021;276:114595. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114595>
21. Грязев М.В., Качурин Н.М., Стас Г.В. Пылегазовые выбросы с поверхности породных отвалов ликвидированных шахт угольного бассейна. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2018;10(4):500–508. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2018-10-4-500-508>
Gryazev M.V., Kachurin N.M., Stas G.V. Dust and gas emissions from the dumps surfaces of the liquidated mines of the Moscow Coal basin. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2018;10(4):500–508. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2018-10-4-500-508>

22. Plangovan S., Senthil Kumaran S., Naresh K., Shankar K., Velmurugan R. Studies on glass/epoxy and basalt/epoxy thin-walled pressure vessels subjected to internal pressure using ultrasonic 'C' scan technique. *Thin-Walled Structures*. 2023;182(A):110–116. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110160>
23. Silva N.S., Netto T.A., Bastian F.L., Silva R.A.F. On the effect of the ply stacking sequence on the failure of composite pipes under external pressure. *Marine Structures*. 2020;70:102–115. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2019.102658>
24. Панфилова Т.А., Тынченко В.С., Кукарцев В.А., Башмур К.А., Кондратьев В.В. К концепции выщелачивания металлосодержащего сырья в дезинтеграторе. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(11-1):239–251. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_239
Panfilova T.A., Tynchenko V.S., Kukartsev V.A., Bashmur K.A., Kondratiev V.V. To the concept of leaching metal-containing raw materials in the dizintegrator. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11-1):239–251. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_239
25. Луганцев Б.Б., Чавкин А.И., Турук Ю.В., Воронова Э.Ю., Исаков В.С. Необходимость и область применения нержавеющей анкеров. *Горная промышленность*. 2024;(1):94–98. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-1-94-98>
Lugancev B.B., Chavkin A.I., Turuk Ju.V., Voronova E.Yu., Isakov V.S. The need for and scope of application of stainless steel rock bolts. *Russian Mining Industry*. 2024;(1):94–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-1-94-98>
26. Галачиева С.В., Махосева С.А., Жаноква М.В. Развитие эколого-ориентированной экономики высокогорного региона на примере применения инновационных технологий в полимерной химии. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(3):528–538. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-528-538>
Galachieva S.V., Makhosheva S.A., Zhanokova M.V. Development of an environmentally oriented economy in a high-mountain region using the example of the application of innovative technologies in polymer chemistry. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(3):528–538. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-528-538>
27. Tian H., Wei C., Lai Y., Chen P. Quantification of water content during freeze – thaw cycles: A nuclear magnetic resonance based method. *Vadose Zone Journal*. 2018;17(1):1–12. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.12.0124>
28. Sherov A.K., Sherov K.T., Sikhimbayev M.R., Absadykov B.N., Kuanov I.S. Research of qualitative indicators of a gear pump with two-shaft connection for pumping petroleum products. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. 2021;4(448):108–116. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.88>
29. Bao X., Wang Z., Fu D., Shi C., Iglesias G., Cui H., Sun Z. Machine learning methods for damage detection of thermoplastic composite pipes under noise conditions. *Ocean Engineering*. 2022;248:110817. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110817>
30. Pashkov E.N., Martyushev N.V., Ponomarev A.V. An investigation into autobalancing devices with multireservoir system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2014;66:012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/66/1/012014>
31. Fang P., Xu Y., Gao Y., Ali L., Bai Y. Mechanical responses of a fiberglass flexible pipe subject to tension & internal pressure. *Thin-Walled Structures*. 2022;181:110107. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110107>
32. Vidayev I.G., Martyushev N.V., Ivashutenko A.S., Bogdan A.M. The resource efficiency assessment technique for the foundry production. *Advanced Materials Research*. 2014;880:141–145. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141>

Информация об авторах

Ермаков Борис Сергеевич – доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0008-0932-2408>; e-mail: ermakov_bs@spbstu.ru

Швецов Олег Викторович – кандидат технических наук, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-9368-4074>; e-mail: shvetsov_ov@spbstu.ru

Вологжанина Светлана Антониновна – доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-7675-865X>; e-mail: svet_spb@mail.ru

Нечаев Даниил Валерьевич – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-5997-143X>; e-mail: nechaev_dv@spbstu.ru

Карпов Иван Дмитриевич – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: karpov_id@spbstu.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 08.09.2024

Поступила после рецензирования: 24.10.2024

Принята к публикации: 31.10.2024

Information about the authors

Boris S. Ermakov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Peter the Great St. Petersburg Politechnik University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0008-0932-2408>; e-mail: ermakov_bs@spbstu.ru

Oleg V. Shvetsov – Cand. Sci. (Eng.), Peter the Great St. Petersburg Politechnik University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-9368-4074>; e-mail: shvetsov_ov@spbstu.ru

Svetlana A. Vologzhanina – Dr. Sci. (Eng.), Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-7675-865X>; e-mail: svet_spb@mail.ru

Daniil V. Nechaev – Peter the Great St. Petersburg Politechnik University, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: nechaev_dv@spbstu.ru

Ivan D. Karpov – Peter the Great St. Petersburg Politechnik University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-5997-143X>; e-mail: karpov_id@spbstu.ru

Article info

Received: 08.09.2024

Revised: 24.10.2024

Accepted: 31.10.2024