



Оригинальная статья

Энергоемкость разрушения карбонатных пород в нивальных условиях при различных уровнях засоленности

Е. В. Захаров✉

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉zaharoff@igds.ysn.ru

Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований по установлению влияния знакопеременного температурного воздействия на энергоемкость разрушения образцов доломита трубки «Интернациональная» и известняков карьера «Мохсоголлох» в нивальных условиях, при насыщении их растворами солей (NaCl) различных концентраций. Концентрация соли в растворе составляла от 0–20 %. Исследования выявили, что после пяти циклов замораживания-оттаивания в нивальной среде без содержания в растворе соли (0 %), энергозатраты на разрушение доломита трубки «Интернациональная» снижаются на 6 %. С увеличением концентрации соли в растворе энергоемкость разрушения образцов доломита повышается вплоть до первоначальных значений, соответствующих исходным показателям разрушения (без воздействия циклов). Энергоемкость разрушения образцов известняка карьера «Мохсоголлох» под действием пяти циклов замораживания-оттаивания в нивальных условиях максимально снижается на 15 %, при любом содержании соли в растворе. В отличие от доломита трубки «Интернациональная» влияние концентрации соли в растворе на энергоемкость разрушения образцов известняка карьера «Мохсоголлох» не выявлено. Установлено, что нивальные условия выветривания в меньшей степени воздействуют на образцы исследованных пород, чем аквальные.

Ключевые слова: энергоемкость разрушения, доломит, известняк, циклы замораживания-оттаивания, засоленность

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0382-2019-0002 «Исследование прочностных и физико-механических свойств геоматериалов и особенностей развития теплофизических и геомеханических процессов в горных выработках и массивах пород при разработке месторождений полезных ископаемых в условиях естественно низких температур»).

Для цитирования: Захаров Е.В. Энергоемкость разрушения карбонатных пород в нивальных условиях при различных уровнях засоленности. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):231–237. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-231-237>

Original article

The energy intensity of carbonate rock destruction under nival conditions at varying salinity levels

Evgeniy V. Zakharov✉

N.V. Chersky Mining Institute of the North,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉zaharoff@igds.ysn.ru

Abstract

This article presents the findings of experimental investigations conducted to assess the influence of alternating temperature variations on the energy consumption associated with the destruction of dolomite samples from the Internationalnaya pipe and limestone samples from the Mokhsogolloh quarry. The evaluations were carried out under nival conditions, involving exposure to varying concentrations of sodium chloride (NaCl) solutions, with salt concentra-

tions ranging from 0% to 20%. The findings reveal that after five freeze-thaw cycles in a nival environment, the energy required for the destruction of dolomite from the Internatsionalnaya pipe decreased by 6% in the absence of salt (0% concentration). However, as the concentration of salt in the solution increased, the energy necessary for the destruction of the dolomite samples escalated to levels comparable to those recorded prior to the freeze-thaw cycles. In contrast, the energy required for the degradation of limestone samples from the Mokhsogolloh quarry decreased by a maximum of 15% after five freeze-thaw cycles, regardless of the salt concentration present in the solution. Thus, unlike the dolomite from the Internatsionalnaya pipe, the influence of salt concentration on the energy intensity of limestone destruction from the Mokhsogolloh quarry was not observed. Furthermore, it was concluded that nival weathering conditions have a lesser effect on the examined rock samples compared to aquatic conditions.

Keywords: energy capacity of destruction, dolomite, limestone, freeze-thaw cycles, salinity

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 0382-2019-0002, entitled “The strength and physical-mechanical properties of geomaterials and the characteristics of thermophysical and geomechanical processes in mine workings and rock masses during the extraction of mineral deposits in naturally low temperature conditions”).

For citation: Zakharov E.V. The energy intensity of carbonate rock destruction under nival conditions at varying salinity levels. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):231–237. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-231-237>

Введение

Проведенные ранее исследования, выполненные в ИГДС СО РАН, показали возможность снижения в два раза и более энергозатрат на разрушение карбонатных пород алмазных месторождений Якутии под влиянием циклического замораживания-оттаивания [1]. Однако, данные результаты были получены для образцов горных пород, замораживаемых в водной среде (аквальные), а для воздушно-сухих образцов (аэральные), циклируемых в состоянии естественной влажности, снижение энергозатрат оказалось не столь значительным.

Для разрушения отдельных типов горных пород, находящихся в водонасыщенном состоянии, требуется меньше энергозатрат, что обусловлено снижением их прочностных показателей под влиянием влаги [2–8]. Так, в глинистых породах увлажнение приводит к формированию гидратных слоев вокруг частиц, ослабляя их сцепление. В скальных породах влага проникает в микротрещины и поры, что ведет к разупрочнению горной породы в целом. Это позволяет рассматривать воду как эффективное средство направленного изменения физико-механических характеристик пород. Аналогичный эффект может быть получен при использовании поверхностно-активных веществ, которые снижают энергию поверхностного натяжения за счет адсорбции на границах раздела фаз [9].

Анализ научных публикаций позволяет сделать вывод, что снижение прочности горных пород, основанное на использовании поверхностно-активных веществ, включая растворы солей и чистую воду, представляет собой эконо-

мически выгодный метод разупрочнения. Но в жестких, экстремальных условиях Севера наряду с химическими методами целесообразно использовать температурное воздействие, основанное на использовании естественного ресурса криолитозоны — атмосферного холода, доступного в неограниченном количестве. Наибольшая эффективность может быть достигнута при комбинировании ПАВ с циклическим температурным воздействием в аквальных или, как отмечают некоторые исследователи, в более агрессивных — нивальных условиях [10, 11].

Под нивальными условиями подразумевается криогенное выветривание, при котором породы подвергаются резким перепадам температур (от отрицательных к положительным, и обратно). Примером может служить периодическое проникновение воды в мерзлые массивы, вызывающее термический шок, с последующим повторным замерзанием оттаявшей породы.

Целью работы является определение закономерностей снижения энергозатрат на разрушение пород под влиянием циклического замораживания-оттаивания в нивальных условиях при различных уровнях засоленности среды.

Идея работы заключается в применении знакопеременных температурных воздействий в нивальных условиях на горные породы для снижения энергоемкости их разрушения.

Материалы и методы

Для испытания были выбраны два типа горных пород, значительно различающихся по показателям пористости: доломит тр. «Интернациональная» (АК «АЛРОСА») и известняк карьера «Мохсоголлох» (АО «Якутцемент»). В табл. 1

Основные физические свойства исследуемых пород

Table 1

Basic physical properties of the studied rocks

Порода	Влажность (начальная), %	Плотность истинная, кг/м ³	Объемный вес, кг/м ³	Пористость, %
Доломит тр. «Интернациональная»	1	2831	2430	14,2
Известняк к. «Мохсоголлох»	0,3	2728	2702	1

приведены основные физические свойства исследуемых образцов [12].

Образцы исходных горных пород измельчали до крупности $-20+10$ мм, отмывали от пыли и включений глинистых частиц, а затем в течение суток высушивали при комнатной температуре. В последующем из высушенных образцов методом квартования комплектовали навески испытуемых образцов массой 50 г каждая и в случайном порядке, с учетом трехкратной повторяемости, разделяли в соответствии с блок-схемой проведения эксперимента (табл. 2).

Для моделирования процессов разрушения в условиях нивального воздействия подготовленные навески предварительно в течение 48 ч насыщали раствором хлорида натрия следующих концентраций: 0, 5, 10 и 20 %. После насыщения образцы извлекали из растворов и замораживали в морозильной камере при температуре -20 °С. Замораживание в камере длилось не менее 12 ч, при этом контроль температуры осуществлялся с помощью термодатчика, находящегося в одном из испытуемых образцов.

В дальнейшем замороженные образцы вынимали из морозильной камеры и погружали в растворы солей заданных концентраций, обладающие положительной температурой, где и выдерживали до достижения образцами температуры $+20$ °С. Время полного размораживания составляло около 2 ч. Таким образом моделировался один цикл нивального воздействия на исследуемые образцы. Далее циклы замораживания-оттаивания повторяли: образцы извлекали из теплых растворов и повторно замораживали в морозильной камере при -20 °С. Количество циклов задавали в соответствии с блок-схемой проведения эксперимента (0, 3, 5, 10).

По завершении заданного количества «нивальных» циклов образцы извлекали из растворов, протирали от излишней влаги и сушили при комнатной температуре в течение 48 ч. Высушен-

ные образцы подвергали дроблению на жестком основании при положительной температуре, следуя ранее разработанной методике [13]. Затем определяли удельные энергозатраты на разрушение образцов и анализировали данные статистическими методами, исключая аномальные значения, используя критерии из работ [14, 15]. Для образцов, не подвергавшихся воздействию циклов замораживания-оттаивания, погрешность определения удельных энергозатрат (при надежности 0,95) на разрушение образцов доломита тр. «Интернациональная» составила 13,2 %, известняка к. «Мохсоголлох» – 3,1 %.

Результаты и обсуждение

На основании полученных данных были построены графики изменения энергоемкости разрушения исследованных горных пород в зависимости от засоленности растворов и количества проведенных циклов замораживания-оттаивания в нивальных условиях, а по средним значениям проведены линии тренда (рис. 1, 2).

Анализ данных, полученных в ходе разрушения доломита тр. «Интернациональная» в нивальных условиях, показал, что энергоемкость его

Таблица 2

Блок-схема проведения эксперимента

Table 2

Block diagram of the experiment

Количество ЦЗО в нивальных условиях	Концентрация соли (NaCl), %			
	0	5	10	20
0	5(3)	—	—	—
3	5(3)	5(3)	5(3)	5(3)
5	5(3)	5(3)	5(3)	5(3)
10	5(3)	5(3)	5(3)	5(3)

Примечание. Указано количество испытуемых навесок, в скобках количество повторов.

Note. Number of tested samples, number of tests is given in brackets.

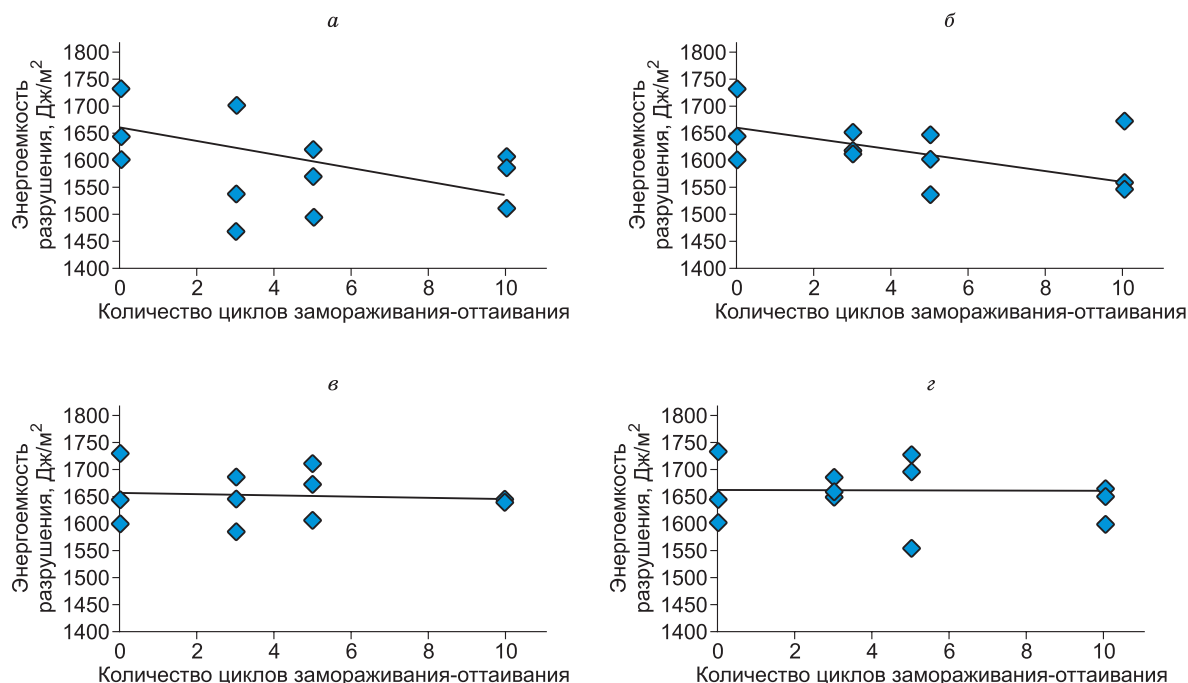


Рис. 1. Энергоемкость разрушения доломита трубки «Интернациональная». Содержание соли (NaCl), %: 0 (а), 5 (б), 10 (в), 20 (г)

Fig. 1. Energy intensity of dolomite destruction in the International pipe. Salt content (NaCl), %: а – 0, б – 5, в – 10, г – 20

разрушения практически не меняется с увеличением концентрации соли в растворе с 10 до 20 %. Существенное снижение энергоемкости было отмечено при испытаниях образцов доломита с содержанием соли 0 (см. рис. 1, а). Наибольшее снижение удельных энергозатрат наблюдается после пяти циклов замораживания-оттаивания, в среднем составляя 6 %, и остается стабильным вплоть до десятого цикла.

В нивальных условиях циклического воздействия известняки карьера «Мохсоголлох», обладая гораздо меньшей пористостью (1 %) по сравнению с доломитами (14,2 %), показали снижение энергоемкости разрушения на 15 % (рис. 2). Максимальное снижение энергозатрат наблюдается при испытаниях известняка после 3–5 нивальных циклов у образцов с концентрацией соли в растворе 0 и 5 % NaCl. Но различия в энергоемкости разрушения при разной концентрации соли минимальны. Таким образом, влияния концентрации солей в растворе на энергоемкость разрушения образцов известняка карьера «Мохсоголлох» не было установлено.

Отсутствие значительных изменений в удельных энергозатратах под действием нивальных условий для исследованных образцов доломита

(см. рис. 1), на наш взгляд, связано с тем, что методически после циклического воздействия температур все образцы вынимали из растворов и высушивали, а затем подвергали дроблению на копре. Таким образом, часть дефектов и трещин, возникающих в образцах при их замораживании, с размораживанием образцов уменьшалась либо полностью исчезала. Другие возможные причины связаны с большой первоначальной пористостью доломита (14,2 %), наличием естественной и создаваемой засоленности породы, а также замораживанием в условиях неполного влагонасыщения, – все эти факторы привели в совокупности к тому, что при замораживании образцов не возникает столь значительных напряжений, способных привести к дезинтеграции породы. Необходимо отметить, что напряжения все же имеются, но, вероятно, не успевают в достаточной мере накопиться и раскрыться за проведенные в ходе экспериментов циклы замораживания-оттаивания.

Под влиянием циклического замораживания-оттаивания в нивальных условиях доломит трубки «Интернациональная» по сравнению с известняком карьера «Мохсоголлох» оказался более устойчив к морозному выветриванию. Анало-

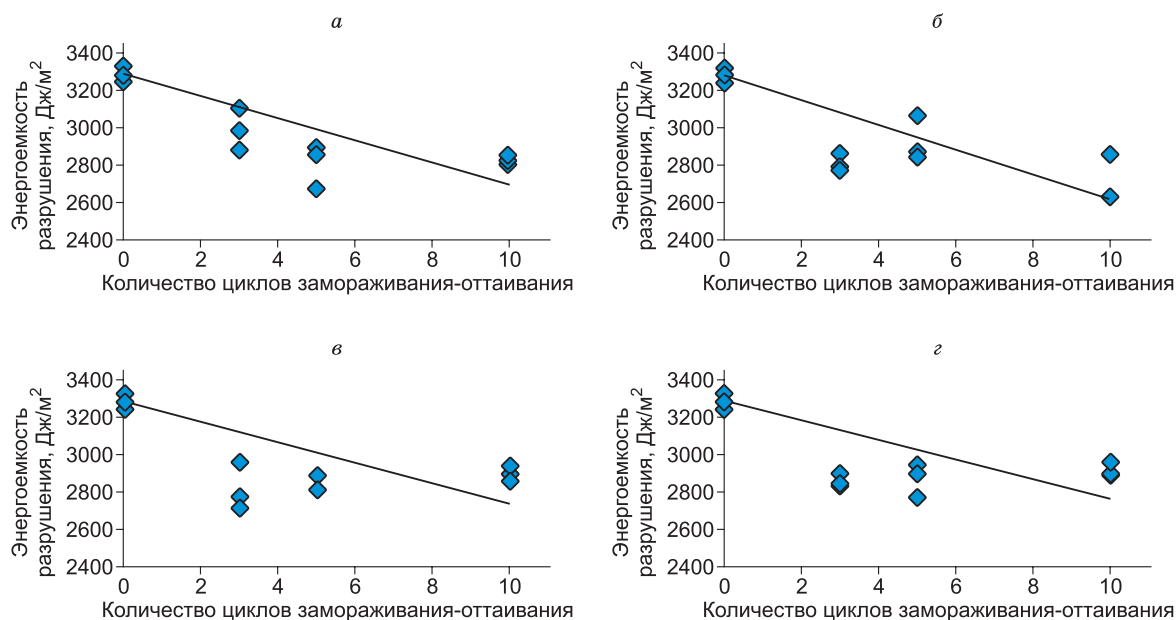


Рис. 2. Энергоемкость разрушения известняка карьера «Мохсоголлох». Поясн. см. рис. 1

Fig. 2. Energy intensity of limestone destruction in the Mokhsogolloh quarry. Explanation see Fig. 1

гичные результаты были получены в работах Мельникова А.Е. [11].

Нивальные условия воздействия оказали незначительное влияние на энергоемкость разрушения исследованных типов горных пород. В ранее выполненных экспериментах нами было установлено, что энергоемкость разрушения образцов известняка карьера «Мохсоголлох» снижается почти на 60 % после пяти циклов замораживания-оттаивания в водной среде (аквальной). То есть аквальные условия замораживания воздействовали на известняк в три-четыре раза сильнее, чем нивальные. С другой стороны, в работе [10] указано, что относительная дезинтеграция пород, разрушающихся в нивальных условиях криогенного выветривания, превышают аквальные в два раза, а аэральные – более чем в 20 раз. Таким образом, полученные экспериментальные данные показывают необходимость проведения дальнейших исследований по установлению влияния криогенного выветривания в нивальных условиях на характеристики разрушаемости горных пород.

Закключение

В ходе экспериментальных работ были установлены закономерности изменения энергоемкости разрушения доломита трубки «Интернациональная» и известняка карьера «Мохсоголлох» под влиянием циклов замораживания-оттаивания

в нивальных условиях при различных концентрациях соли в растворе. Выяснено, что по сравнению с известняком доломит более устойчив к криогенному выветриванию в нивальных условиях, даже при значительной засолённости среды, и его использование в качестве строительного материала (железнодорожные насыпи, отсыпка дорожного полотна и т. д.) является более предпочтительным. Увеличение содержания солей в растворе (10 % и более) приводит к тому, что циклическое замораживание-оттаивание доломита в нивальных условиях практически не влияет на энергоемкость его разрушения.

Список литературы / References

1. Захаров Е.В., Курилко А.С. Энергоемкость разрушения скальных пород алмазных месторождений Якутии после циклов замораживания-оттаивания. *Обогащение руд*. 2018;5(377):11–16. <https://doi.org/10.17580/or.2018.05.02>.
- Zakharov E.V., Kurilko A.S. Energy intensity of rock destruction at diamond deposits in Yakutia after freeze-thaw cycles. *Obogashchenie Rud*. 2018;5(377):11–16. <https://doi.org/10.17580/or.2018.05.02>. (In Russ.)
2. Хохлов Б.В., Рожко М.Д., Дрибан В.А. К вопросу определения коэффициента, учитывающего изменение прочности пород обводненных массивов. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2023;10(2):79–82. <https://doi.org/10.15372/FPVGN2023100212>.

- Khokhlov B.V., Rozhko M.D., Driban V.A. On the issue of determining the coefficient that takes into account the change in the strength of the rocks of water-logged massifs. *Mining sciences: fundamental and applied issues*. 2023;10(2):79–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FPVGN2023100212>.
3. Ермошина Л.Ю., Шипкова А.Е., Тер-Мартirosyan А.З. и др. Определение прочностных характеристик горных пород в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях. *Жилищное строительство*. 2023;(5): 23–28. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-5-23-28>.
- Ermoshina L.Yu., Shipkova A.E., Ter-Martirosyan A.Z., et al. Determination of strength characteristics of rocks in air-dry and water-saturated states. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]*. 2023;(5):23–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-5-23-28>.
4. Захаров Е.В. Влияние влажности на энергоемкость дробления доломита трубки «Интернациональная» при различных температурах. *Обогащение руд*. 2023;(5):3–7. <https://doi.org/10.17580/or.2023.05.01>.
- Zakharov E.V. The effects of humidity on energy intensity of crushing dolomite from the Internationalnaya diamond mine at different temperatures. *Obogashchenie Rud*. 2023;(5):3–7. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2023.05.01>.
5. Wong L.N.Y., Maruvanchery V., Liu G. Water effects on rock strength and stiffness degradation. *Acta Geotechnica*. 2016;11:713–737. <https://doi.org/10.1007/s11440015-0407-7>.
6. Cai X., Zhou Z., Liu K., et al. Water-Weakening effects on the mechanical behavior of different rock types: phenomena and mechanisms. *Applied Sciences*. 2019;9(20):44–50. <https://doi.org/10.3390/app9204450>.
7. Zhou Z., Cai X., Cao W., et al. Influence of water content on mechanical properties of rock in both saturation and drying processes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016;49:3009–3025. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0987-z>.
8. Hashiba K., Fukui K., Kataoka M., et al. Effect of water on the strength and creep lifetime of andesite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018;108:37–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.05.006>.
9. Малкин А.И. Закономерности и механизмы эффекта Ребиндера. *Коллоидный журнал*. 2012;74(2): 239–256.
- Malkin A.I. Regularities and mechanisms of the Rehbinder's effect. *Colloid Journal*. 2012;74(2):223–238.
10. Шестернев Д.М. *Криогипергенез и геотехнические свойства пород криолитозоны*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2001. 266 с.
- Shesternev D.M. *Cryohypergenesis and geotechnical properties of cryolithozone rocks*. Novosibirsk: Publishing House SB RAS; 2001. 266 p. (In Russ.)
11. Мельников А.Е. Влияние криогенного выветривания на развитие деформаций железнодорожной насыпи (на примере участка Томмот–Кердем Амурско-Якутской магистрали): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Нерюнгри; 2015. 24 с.
- Melnikov A.E. The influence of cryogenic weathering on the development of deformations of a railway embankment (using the Tommot-Kerdeg section of the Amur-Yakutsk railway as an example): Abstr. ... Diss. Cand. Sci., Neryungri; 2015. 24 p. (In Russ.)
12. ГОСТ 8269.0-97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. Введ. 01.07.1998. М.: Стандартинформ; 2018. 51 с.
- GOST 8269.0-97. Crushed stone and gravel from dense rocks and industrial waste for construction work. Methods of physical and mechanical testing. Introduced 01.07.1998. Moscow: Standartinform; 2018. 51 p. (In Russ.)
13. Захаров Е., Курилко А.С. Local minimum of energy consumption in hard rock failure in negative temperature range. *Journal of Mining Science*. 2014;50:284–287. <https://doi.org/10.1134/S1062739114020112>.
14. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. *Обработка результатов наблюдений*. М.: Наука; 1970. 104 с.
- Kassandrova O.N., Lebedev V.V. *Processing of observation results*. Moscow: Nauka; 1970. 104 p. (In Russ.)
15. Степнов М.Н. *Вероятностные методы оценки характеристик механических свойств материалов и несущей способности элементов конструкций*. Новосибирск: Наука; 2005. 342 с.
- Stepnov M.N. *Probabilistic methods for assessing the characteristics of mechanical properties of materials and the bearing capacity of structural elements*. Novosibirsk: Nauka; 2005. 342 p. (In Russ.)

Об авторе

ЗАХАРОВ Евгений Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-3812-9534>, ResearcherID: B-4522-2013, Scopus Author ID: 56462361100, SPIN: 7592-6662, e-mail: zaharoff@igs.yasn.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

About the author

ZAKHAROV, Evgeniy Vasilievich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-3812-9534>,
ResearcherID: B-4522-2013, Scopus Author ID: 56462361100, SPIN: 7592-6662, e-mail: zaharoff@igds.ysn.ru

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 30.10.2024

Поступила после рецензирования / Revised 22.04.2025

Принята к публикации / Accepted 15.05.2025