

Устройство для интенсификации предварительного разупрочнения мёрзлых вскрышных пород на карьерах криолитозоны

Д.В. Хосоев✉, А.М. Бураков

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация

✉ hosoev70@mail.ru

Резюме: Основные сложности разработки мерзлых грунтов в зимнее время связаны с самым верхним слоем, разупрочнением которого можно обеспечить оптимальные условия для его разработки. В статье проведено описание разработанного запатентованного устройства, которое может быть использовано при открытой разработке месторождений полезных ископаемых криолитозоны, обеспечивающее интенсификацию предварительного безвзрывного разупрочнения мерзлых вскрышных пород с использованием поверхностно-активных веществ (ПАВ). Подчеркивается, что технической задачей устройства является поддержание постоянного уровня раствора в скважинах без перелива с обеспечением непрерывного проникновения раствора ПАВ в трещины и поры массива за счет гидростатического давления самого раствора ПАВ. Для этого устройство снабжается перфорированным дозатором, обеспечивающим равномерное непрерывное поступление раствора ПАВ. В верхней части оболочки должно быть предусмотрено специальное отверстие или клапан для уравнивания давления внутри ёмкости с атмосферным воздухом, а её нижняя часть для придания ей вертикальной устойчивости присыпается буровой мелочью. Отмечается недостаточная степень внедрения способов разупрочнения горных пород, базирующихся на использовании ПАВ, а также что предложенное устройство приведет к снижению их прочностных и деформационных свойств и позволит в определенных пределах управлять состоянием и свойствами разрабатываемого породного массива на карьерах северных регионов РФ.

Ключевые слова: полезная модель, вскрышные породы, объем скважины, концентрация, засоление мерзлых грунтов, температура замерзания, разупрочнение, карьеры, прочность, криолитозона, поверхностно-активные вещества

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема, №122011800086-1 ЕГИСУ НИОКТР) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Для цитирования: Хосоев Д.В., Бураков А.М. Устройство для интенсификации предварительного разупрочнения мёрзлых вскрышных пород на карьерах криолитозоны. *Горная промышленность*. 2024;(6):135–139. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-135-139>

A device to intensify preliminary softening of frozen overburden at open-pits of the permafrost zone

D.V. Hosoev✉, A.M. Burakov

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

✉ hosoev70@mail.ru

Keywords: The main challenges in mining frozen grounds in winter time are related to the topmost layer, which softening can provide optimal conditions for its removal. The article describes the developed patented device, which can be used in the open-pit mining of mineral deposits in the permafrost zone, providing intensification of preliminary blastless softening of frozen overburden using surface-active substances (surfactants). It is emphasized that the technical task of the device is to maintain a constant level of solution in the boreholes without its overflow, ensuring continuous penetration of the surfactant solution into the cracks and pores of the ground mass due to the hydrostatic pressure of the surfactant solution itself. For this purpose, the device is fitted with a perforated dispenser to ensure a uniform, continuous supply of the surfactant solution. A dedicated hole or valve should be provided in the upper part of the shell to balance the pressure inside the tank with atmospheric pressure, and its lower part is covered with drilling fines to provide its vertical stability. An insufficient degree of implementing the surfactant-based methods of rock softening is noted, as well as the fact that the proposed device will cause a decrease in their strength and deformation properties and will allow, within certain limits, to control the state and properties of the mined rock mass in open-pit mines in the northern regions of the Russian Federation.

Keywords: useful model, overburden formation, borehole volume, concentration, salinization of frozen ground, freezing temperature, softening, open pit mines, strength, permafrost zone, surfactants

Acknowledgments: The study was carried out within the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Topic No. 122011800086-1, EGISU NIOCTR) using instruments that belong to the Shared core facilities of the Federal Research Center, Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Hosoev D.V., Burakov A.M. A device to intensify preliminary softening of frozen overburden at open-pits of the permafrost zone. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):135–139. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-135-139>

Введение

Одним из наиболее перспективных направлений научных исследований в области горного дела является разработка методов управления свойствами и состоянием разрабатываемых горных массивов месторождений твердых полезных ископаемых. При этом повышение эффективности горных работ может быть достигнуто, в частности, снижением энергоёмкости процессов механического разрушения горных пород, что может быть достигнуто использованием поверхностно-активных веществ (ПАВ) [1–4]. Растворы ПАВ за счет механизма адсорбции интенсивно проникают в трещины и на контакты минеральных зерен пород, снижая поверхностную энергию сцепления. Их действие основано на адсорбционном понижении поверхностной энергии тел (эффект Ребиндера). Поэтому эффективность действия ПАВ зависит от величины свободной поверхности трещин и межзеренных контактов пород горного массива. Приоритет в развитии данного направления исследований принадлежит отечественным ученым (Ю.В. Горюнов, Ф.Д. Овчаренко, Н.В. Перцов, П.А. Ребиндер, Е.Д. Шукикин и др.).

ПАВ широко используются во многих областях промышленности, но в горном деле, в том числе в процессах разрушения пород, их применение носит весьма ограниченный характер. Немногочисленные работы в этом направлении не выходят, как правило, за рамки экспериментальных исследований. Применительно к процессам горного производства (бурение, резание, борьба с пылью), различным аспектам теории и практики использования ПАВ посвящены работы А.Д. Алексеева, Г.Я. Воронкова, И.И. Круглицкого, Н.В. Кусова, О.Г. Латышева, Г.И. Марцинкевича, Ю.И. Анистратова, О.А. Эдельштейна и др. С их участием также разработаны способы, технические решения и устройства, способствующие повышению эффективности использования методов разупрочнения горных пород, базирующихся на использовании ПАВ. Тем не менее их применение в условиях криолитозоны зачастую ограничено по ряду причин.

Результаты и их обсуждение

Основные сложности с разработкой мерзлых грунтов в зимнее время связаны с самым верхним слоем, разупрочнением которого можно обеспечить оптимальные условия для его разработки.

Характер физико-механических процессов, протекающих в месте контакта поверхностно-активной среды (раствора) с горной породой, определяет избирательность действия ПАВ. Как показывает опыт, неверно подобранные растворы ПАВ могут не только снижать эффективность разупрочняющих процессов, но и оказывать противо-

ложное действие. В этой связи первоочередной задачей является выбор оптимального состава и концентрации растворов ПАВ.

Объективно самым надежным способом выбора ПАВ является опробование их составов в реальном технологическом процессе. Однако высокая трудоемкость промышленных испытаний при огромном количестве производимых ПАВ и необходимость выбора для каждого из них строго фиксированной концентрации делают такой путь практически нереализуемым.

Для этих целей ИГДС СО РАН было разработано устройство [5], технической задачей которого является обеспечение повышенной интенсивности процессов разупрочнения мерзлых горных пород путем обеспечения непрерывного проникновения раствора ПАВ в трещины и поры массива, окружающего каждую скважину, за счет гидростатического давления (веса) самого раствора.

Устройство по конструкции несложное (рис. 1) и может быть изготовлено кустарным способом в мастерских горного предприятия, состоит из емкости в виде картонного цилиндра, внутри которого размещена герметичная оболочка с горловиной, наполненная раствором NaCl в концентрации 15–75%. Устройство горловиной вставляется в устьевую часть предварительно пробуренной скважины. Объем герметичной оболочки цилиндра должен превосходить объем скважины не менее чем в три раза, а высота цилиндра не менее чем в два раза его диаметр. Горловина оболочки оборудована перфорированным дозатором, обеспечивающим равномерное поступление раствора NaCl без его перелива из скважины. В верхней части оболочки должно быть предусмотрено специальное отверстие или клапан для уравнивания давления внутри емкости с атмосферным воздухом, а её нижняя часть для придания ей вертикальной устойчивости присыпается буровой мелочью.

Пробуренные по расчетной схеме скважины перед установкой устройства на всю высоту заполняются раствором ПАВ. Находящийся в емкости раствор под действием собственного веса будет постепенно проникать в мерзлый горный массив вокруг скважин по имеющимся трещинам, пустотам и порам, взаимодействовать со льдом-цементом за счёт диффузии, изменяя фазовое равновесие системы лёд–вода–соль с его одновременным разупрочнением.

Как известно, при искусственном засолении мерзлых и осадочных пород грунтов изменяются (как правило, снижаются) их физико-механические свойства. В частности, прочность дисперсных горных пород в зависимости от степени насыщения раствором NaCl в концентрации 15–20%, будет уменьшаться, темп изменения иллюстрируется графиками, представленными на рис. 2. Примерно такие же

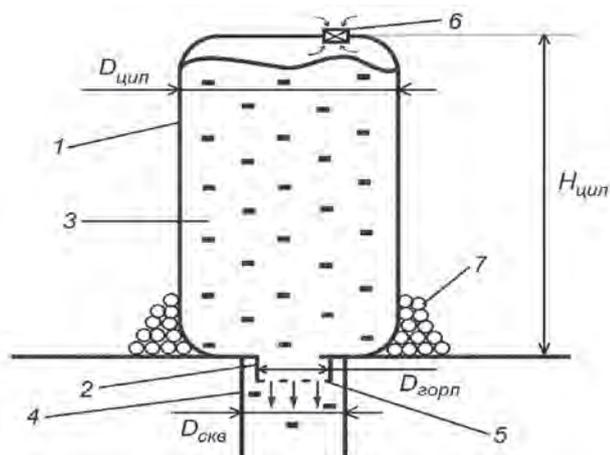


Рис. 1
Устройство для непрерывного предварительного разупрочнения мёрзлых горных пород вокруг скважины: 1 – цилиндр; 2 – горловина; 3 – раствор ПАВ; 4 – скважина; 5 – перфорированный дозатор; 6 – клапан выравнивания давления; 7 – буровая мелочь

Fig. 1
Device for continuous preliminary softening of frozen rocks around the borehole: 1 - cylinder; 2 - neck; 3 - surfactant solution; 4 - borehole; 5 - perforated dispenser; 6 - pressure balance valve; 7 - drilling fines



Рис. 2
Снижение прочности на сжатие образцов грунтов, засоленных раствором поваренной соли: 1 – лессовидный суглинок $w = 20\%$, $T = -20^\circ\text{C}$; 2 – мелкозернистый песок $w = 15\%$, $T = -20^\circ\text{C}$; 3 – мелкозернистый песок $w = 10\%$, $T = -10^\circ\text{C}$.

Fig. 2
Decreasing compressive strength of soil samples salinized with the cooking salt solution: 1 – loess loam $w = 20\%$, $T = -20^\circ\text{C}$; 2 – fine sand $w = 15\%$, $T = -20^\circ\text{C}$; 3 – fine sand $w = 10\%$, $T = -10^\circ\text{C}$.

зависимости характерны для осадочных вскрышных пород большинства карьеров Севера.

Представленные на рисунке графики характеризуют снижение условно-мгновенной прочности на сжатие мелкозернистого песка и несвязного лессовидного суглинка при повышении концентрации раствора хлорида натрия, используемого в качестве ПАВ, и их первоначальной влажности. Отчетливо видно, что более резкое снижение прочности при одинаковой концентрации раствора соли, значениях влажности и отрицательной температуры наблюдается в грубодисперсных средах.

Для установления зависимости влияния растворов NaCl различной концентрации на прочностные свойства мерзлых вскрышных пород (различных типов мелкозернистых песчаников) Эльгинского месторождения были проведены эксперименты в соответствии с разработанной методикой, приведенной в работе [6].

Использовались растворы NaCl – 5-, 10- и 20%-ной концентрации. Определение прочности на одноосное сжатие проводилось на 5 образцах при отрицательных температурах (-5 , -10 и -20°C) на испытательной машине UTS – 250.

Результаты проведенных лабораторных исследований показали, что предварительное пропитывание образцов пород раствором хлорида натрия приводит к существенному уменьшению прочности в условиях отрицательных температур до -20°C . В частности, прочность на сжатие снизилась на 30–50%, прочность на растяжение уменьшилась примерно на 50% по всем типам песчаников. Такое снижение прочностных характеристик пород после воздействия водных растворов ПАВ позволяет их перевести в категорию легко разрабатываемых, требующих гораздо меньших усилий при резании и, как следствие этого, энергетических затрат.

В работе [7] приведены сведения о выполненных экспериментальных работах по разупрочнению вскрышных пород в природных условиях на опытном участке в районе карьера алмазосодержащей трубки «Юбилейная АК АЛРОСА». Параллельно с этим участком (в 10–12 м от него) был выбран такой же по площади контрольный. Работы выполнялись в период, наиболее близкий к началу промерзания сезонно-талого слоя пород: конец сентября – начало октября 1986 г. После удаления снежного покрова на каждом квадратном метре грунта пробивалось 15–20 лунок на глубину 12–15 см, в которые заливалась концентрированная соляная кислота в количестве, необходимом для обеспечения концентрации 0,5 и 0,05 Н. Оптимальный расход кислоты составляет, например, для получения концентрации 0,5 Н при влажности породы 30–35% около 50 л на 10 м^2 поверхности пород.

По результатам проведенных исследований было сделано заключение, что в целом степень разупрочнения различных групп пород в мерзлом состоянии соляной кислотой определенной концентрации примерно одинакова, прочность снизилась на 40–50%. Следовательно, химический метод разупрочнения может быть универсальным и применимым для всех вскрышных пород этого месторождения. Однако необходимо отметить, что использование концентрированной соляной кислоты требует применения дополнительных мер по защите от его агрессивного воздействия на оборудование, обслуживающий персонал и на окружающую среду. В связи с этим использование кислот в качестве ПАВ довольно проблематично.

В работе [8] были проведены исследования прочностных характеристик на образцах горных пород одного из золоторудных месторождений Забайкальского края как в естественном состоянии, так и после пропитки в водном растворе ПАВ в течение 48 ч. Процесс обработки полученных результатов испытаний включал в себя: вычисление среднего арифметического значения предела прочности при одноосном сжатии, вычисление среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации. Результаты определения прочности пород при одноосном сжатии приведены в табл. 1.

Анализируя данные таблицы, можно сделать вывод, что пропитка образцов водным раствором ПАВ привела к

Таблица 1
Результаты определения предела прочности образцов при одноосном сжатии

Table 1
Results of determining uniaxial compressive strength of the specimens

Горная порода	В естественном состоянии		После обработки образцов раствором ПАВ	
	Число образцов	Прочность, МПа	Число образцов	Прочность, МПа
Роговики	8	180,8	7	157,4
Березиты	9	135,3	8	91,4
Кварц-гидрослюдистые метасоматиты	9	107,9	7	62,3
Хлориты	9	99,3	7	78,2

снижению их прочности на одноосное сжатие. Так, прочность березитов снизилась на 32,4% – с 135,3 до 91,4 МПа, кварц-гидрослюдистых метасоматитов – на 42,3%, с 107,9 до 62,3 МПа, хлоритов – на 21,2%, с 99,3 до 78,2 МПа, что подтверждает эффективность применения ПАВ.

Подобные исследования были также проведены на Талдинском угольном месторождении при пропитке породного массива раствором ПАВ через сеть скважин 1,3×1,3 м в течение двух суток, прочность на сжатие снизилась у аргиллитов и алевролитов с 90 до 70 МПа, а у мелкозернистых песчаников – с 93 до 60 МПа [9]. Тем самым также доказывается целесообразность использования ПАВ для разупрочнения породного массива.

Как известно, эффективность ПАВ во многом определяется температурными условиями, на основании литературных источников была составлена табл. 2. В ней приведены справочные данные по растворимости хлоридов натрия, кальция, калия и магния в зависимости от температуры. Знаком (*) отмечены концентрации и температуры, соответствующие точке эвтектики для каждой соли. Соль, будучи смешанной со льдом (в том числе в форме снега), вызывает его таяние (плавление). Образовавшийся водно-солевой раствор имеет температуру кристаллизации (замерзает) ниже 0 °С, которая зависит от количества соли в растворе (чем выше концентрация, тем ниже температура кристаллизации раствора).

Данные табл. 2 свидетельствуют, что наименее низкую температуру замерзания имеют хлориды магния.

Далее приведены результаты расчётов оптимальных параметров реализации предлагаемого устройства на практике для разупрочнения мёрзлых горных пород вокруг скважины в условиях карьеров криолитозоны.

Например, при длине скважины $L_{скв} = 5$ м с диаметром $D_{скв} = 0,2$ м, температуре горных пород вскрыши $T_{пор} = -10$ °С расстояние, на которое проникнет раствор NaCl в концентрации 16%, разупрочняющий мёрзлые горные породы, составит $R \approx 3,5$ м.

Таким образом, есть основание утверждать, что предлагаемое устройство будет способствовать интенсификации предварительного разупрочнения мёрзлых вскрышных пород при открытой разработке месторождений криоли-

Таблица 2
Температура замерзания растворов противомерзающих реагентов, используемых в качестве ПАВ

Table 2
Freezing point of the anti-freezing reagent solutions used as surfactants

Концентрация, %	Температура замерзания, °С			
	NaCl	CaCl2	MgCl2	KCl
2	-1,2		-1,1	-0,9
4	-2,45		-2,3	-1,9
6	-3,75		-3,7	-2,8
8	-5,11		-5,5	-3,8
10	-6,62	-7	-7,7	-4,8
12	-8,28	-9	-10,1	-5,9
14	-10,00	-11	-13,4	-7,0
16	-11,90	-13	-17,4	-8,2
18	-14,00	-17	-22,6	-9,6
19,74*				-10,7*
20	-16,30	-20	-29,0	
21*		-22	-33,5*	
22	-19,00	-24		
23,3*	-21,20*			
24		-29		
26		-35		
28		-43		
29,6*		-51*		

Примечание. * концентрации и температуры, соответствующие точке эвтектики для каждой соли.

Note. * concentrations and temperatures corresponding to the eutectic point for each salt.

тозоны за счет воздействия водных растворов ПАВ, что к тому же позволит в определенных пределах управлять состоянием и свойствами горного массива, способствовать повышению эффективности ведения горных работ безвзрывной технологией.

Выводы

По мнению авторов, внедрение устройства позволит:

- отказаться от дорогостоящих и небезопасных взрывных работ;
- обеспечить непрерывное, равномерное поступление раствора ПАВ в скважину через перфорированный дозатор, размещённый в горловине устройства;
- предотвратить переливание раствора ПАВ из скважины, снижая его расход;
- отказаться от постоянного присутствия людей на уступе карьера для дозалива скважин раствором;
- обеспечить увеличение производительности горных машин;
- уменьшить поступление токсичных газов и пыли в окружающую среду.

Список литературы / References

1. Латышев О.Г., Жилин А.С., Осипов И.С., Сынбулатов В.В., Латышев О.Г. Выбор поверхностно-активной среды для управления свойствами пород в горной технологии. Известия высших учебных заведений. *Горный журнал*. 2004;(6):117–121. Latyshev O.G., Zhilin A.S., Osipov I.S., Synbulatov V.V. Selection of surfactant media to control rock properties in mining technology. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2004;(6):117–121. (In Russ.)
2. Анистратов Ю.И., Штейнцар Р.М., Воронков Г.Я., Кузнецов А.Г., Хаспеков П.Р. Перспективы расширения сферы применения безвзрывных технологий в открытой угледобыче. *Горная промышленность*. 1998;(2):14–19. Anistratov Yu.I., Shteintsag R.M., Voronkov G.Ya., Kuznetsov A.G., Khaspekov P.R. Prospects for expanding the scope of application of non-bursting technologies in open-pit coal mining. *Russian Mining Industry*. 1998;(2):14–19. (In Russ.)
3. Норов Ю.Д., Мардонов У.М., Тошев О.Э. Изучение влияния водных растворов ПАВ на изменение прочности горного массива. *Горный журнал*. 2005;(3):15–16. Norov Yu.D., Mardonov U.M., Toshev O.E. Studying the impact of aqueous surfactant solutions on changes in the rock mass strength. *Gornyi Zhurnal*. 2005;(3):15–16. (In Russ.)
4. Тошев О.Э., Ахтамов Ф.Э., Тошов С.Б., Элмуродова М.О.И., Сафаркулов М.Р.З. Физико-химическое воздействие растворов поверхностно-активных веществ на твердых полезных ископаемых для ослабления их прочностных характеристик. *Universum: технические науки*. 2021;(12-2):24–27. Toshev O.E., Akhtamof F.E., Toshov S.B., Elmurodova M.O.I., Safarkulov M.R.Z. Physico-chemical effects of surface-active solutions on solid fossils to weaken their strength characteristics. *Universum: Tekhnicheskie Nauki*. 2021;(12-2):24–27.
5. Хосоев Д.В., Каймонов М.В., Панишев С.В. Устройство для непрерывного предварительного разупрочнения мерзлых горных пород вокруг скважины. Патент №221470 РФ, МПК E21C27/00; заявл. 24.04.2023; опубл. 08.11.2023, Бюл. №31.
6. Панишев С.В., Хосоев Д.В., Матвеев А.И. Повышение эффективности разработки вскрышных пород и углей Эльгинского месторождения Якутии путем их разупрочнения с использованием поверхностно-активных веществ. *Горная промышленность*. 2021;(1):98–104. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-1-98-104> Panishev S.V., Hosoev D.V., Matveev A.I. Enhancing efficiency of overburden removal and coal mining at elginsky coal deposit in yakutia by their softening with surfactants. *Russian Mining Industry*. 2021;(1):98–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-1-98-104>
7. Шишкин Ю.П., Микулевич А.П., Бураков А.М. Экспериментальные исследования безвзрывного разупрочнения многолетнемерзлых пород на алмазоносном месторождении. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 1990;(4):79–84. Shishkin Yu.P., Mikulevich A.P., Burakov A.M. Experimental studies of blast-free softening of perennially frozen rocks at a diamondiferous deposit. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 1990;(4):79–84. (In Russ.)
8. Чебан А.Ю., Секисов А.Г., Рассказов М.И., Цой Д.И., Терешкина А.А. Повышение эффективности селективной выемки богатых руд путем их предварительного физико-химического разупрочнения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(9):29–41. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_9_0_29 Cheban A.Yu., Sekisov A.G., Rasskazov M.I., Tsoi D.I., Tereshkina A.A. Efficiency upgrading in selective mining of high-grade ore by means of preliminary physicochemical softening. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(9):29–41. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_9_0_29
9. Штейнцар Р.М. Пути повышения качества рабочего процесса машин типа КСМ-2000Р. *Горная промышленность*. 1998;(4):9–16. Shteintsag R.M. Ways to improve the quality of the work process of machines such as KSM-2000R. *Russian Mining Industry*. 1998;(4):9–16. (In Russ.)

Информация об авторах

Хосоев Доржо Владимирович – ведущий инженер, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1466-8509>; e-mail: hosoev70@mail.ru

Бураков Александр Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация

Information about the authors

Dorzhov V. Hosoev – Leading Engineer, Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1466-8509>; e-mail: hosoev70@mail.ru

Alexander M. Burakov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IGDS SB RAS), Yakutsk, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 07.10.2024

Поступила после рецензирования: 25.11.2024

Принята к публикации: 03.12.2024

Article info

Received: 07.10.2024

Revised: 25.11.2024

Accepted: 03.12.2024