

И.О. Норин<sup>1</sup>, К.Г. Пугин<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Пермский государственный аграрно-технологический университет  
имени академика Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия

<sup>3</sup>Пермский филиал Волжского государственного университета  
водного транспорта, Пермь, Россия

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ПУЧИНИСТЫХ ГРУНТОВ С ПОМОЩЬЮ ХЛОРИДА КАЛИЯ

Множество регионов Российской Федерации сталкиваются с проблемой дефицита инертных материалов требуемого качества, необходимых при ремонте, реконструкции и строительстве новых автомобильных дорог, особенно в условиях работы над национальным проектом «Безопасные качественные дороги». В связи с этим активно проводятся исследования, посвященные разработке эффективных составов альтернативных смесей, применяемых при возведении земляного полотна автомобильных дорог или строительстве нежестких дорожных одежд.

В данной статье проведен анализ отечественных и зарубежных исследований, в которых рассматривается возможность использования компонентов, входящих в состав отходов ООО «ЕвроХим – Усольский калийных комбинат» (хлорид калия (KCl) и в большей степени хлорид натрия (NaCl)) в качестве агентов, влияющих на физико-механические характеристики глинистых грунтов Пермского края.

Использование галитовых отходов при условии соблюдения пропорций смешивания в строительстве автомобильных дорог предоставляет возможность увеличить межремонтные сроки и сократить потребление инертных материалов для устройства слоев оснований дорожной одежды. Негативное воздействие окружающей среды на конструктивные слои автомобильной дороги проявляется в создании условий морозного пучения грунта, снижение несущей способности из-за повышенной влажности, изменении структуры грунта и его замораживания.

С помощью методов, влияющих на основные характеристики грунтов, таких как использование галитовых отходов промышленного производства, можно предотвратить или отсрочить разрушение дорожных одежд, за счет увеличения прочностных характеристик земляного полотна и оснований. Такой подход способен снизить объемы размещаемых промышленных отходов на территории предприятий, а также снизить себестоимость строительства.

**Ключевые слова:** автомобильные дороги, укрепление грунта, глинистый грунт, повышение прочности, устойчивость грунта, отходы промышленности, галитовые отходы.

С постоянным увеличением масштабов мобильности, а также ростом парка автотранспорта существующая дорожная инфраструктура не удов-

летворяет требованиям обеспечения непрерывного и безопасного движения транспорта.

Проблемы с загруженностью автомобильных дорог приводят к заторам, что негативно сказывается на экономике и качестве жизни людей. Неспособность существующей дорожной сети в полной мере справляться с растущими потоками транспорта в конечном итоге приводит к загрязнению окружающей среды и негативным последствиям для здоровья.

Недостаточно развитая дорожная инфраструктура может быть препятствием для экономического роста и развития регионов, ограничивая доступность рынков и возможности развития предприятий.

В 2021 г. были произведены расширения и модификации в рамках национального проекта «Безопасные качественные дороги». Количество субъектов – участников этого проекта увеличилось до 84, к ним присоединилась Санкт-Петербургская агломерация. Кроме того, к структуре проекта были добавлены два дополнительных федеральных проекта «Развитие общественного транспорта» и «Развитие федеральной магистральной сети». Срок реализации национального проекта был продлен до 2030 г.

Одним из ключевых аспектов при осуществлении данного национально проекта является использование передовых технологий и материалов. В процессе проведения ремонтных работ почти во всех регионах активно внедряются передовые методы, которые были успешно применены на федеральных автодорогах. Более 50 % из заключенных контрактов на ремонт дорог в 2020 г. включали в себя использование современных технологий.

Решение проблемы развития дорожного строительства требует комплексного подхода и содействия со стороны правительства и научного сообщества. Появляется необходимость в разработке современных проектов, основываясь на передовых технологиях и методах, которые позволят обеспечить устойчивость дорожных покрытий, снизить затраты на содержание и ремонт.

Актуальным вызовом в области дорожного строительства является необходимость снижения затрат на строительство и содержание дорожной сети. Современное строительство сталкивается с проблемой дефицита материалов и повышения их стоимости. Для обеспечения экономической эффективности необходимо искать более доступные и эффективные материалы, не уступающие по показателям физико-механических характеристик [1, 2]. Исследование и разработка новых материалов, как и оптимизация производственных процессов, могут способствовать снижению себестоимости строительства.

Грунты, представленные в Пермском крае, характеризуются значительным разнообразием по механическим характеристикам, но преоблада-

дающими являются глины и суглинки. Следует отметить, что значительная часть (до 80 %) минералогического состава данной территории составляют грунты с тяжелыми механическими свойствами. В частности, среди грунтового состава региона обнаруживаются следующие доли, %: 45,1 составляют тяжелые суглинки, 15,1 – средние суглинки, 4,2 – легкие суглинки и 8,2 – супесчаные и песчаные грунты [3]. Эти типы грунтов характеризуются высокой степенью дисперсности, что предполагает значительную изменчивость их свойств под воздействием внешних факторов, таких как влажность, температура и механические нагрузки.

Строительные лаборатории систематически осуществляют испытания местных грунтов с целью проведения оценки механических характеристик, что имеет первостепенное значение для определения пригодности данных участков для строительных работ и обеспечения надежных условий строительства. Лабораторные испытания местных грунтов были проведены по меньшей мере в четырех районах Пермского края: Майкорском, Ординском, Соликамском и Частинском. Показатели физико-механических характеристик приведены в табл. 1, зерновой состав – в табл. 2.

Таблица 1

Показатели физико-механических характеристик грунтов Пермского края

Показатель	Район			
	Майкорский	Ординский	Соликамский	Частинский
Оптимальная влажность, %	19,0	21,3	20,8	21,4
Максимальная плотность скелета грунта, г/см <sup>3</sup>	1,66	1,77	1,79	1,76
Влажность на границе раскатывания, %	16,3	19,7	19,0	19,2
Влажность на границе текучести, %	31,0	40,0	39,2	39,2
Число пластичности	14,7	20,3	20,2	20,0
Показатель текучести	0,21	0,33	0,15	0,24
Естественная влажность, %	19,9	22,5	22,1	22,6
Содержание песчаных частиц (2–0,05 мм), %	49,7	1,8	46,6	30,2

Согласно приложению Б СП 34.13330.2021 «Автомобильные дороги», Пермский край относится ко 2-й дорожно-климатической зоне. Наименьший коэффициент уплотнения грунта рабочего слоя земляного полотна при устройстве капитального типа дорожных одежд принимается в диапазоне от 0,98 до 1,0, из чего следует, что допустимая влажность в долях от оптимальной при требуемом коэффициенте уплотнения равна 1,05 (таблица В.12 СП 34.13330.2021 «Автомобильные дороги»).

Таблица 2

## Зерновой состав и типы грунтов Пермского края

Размер отверстий сит, мм	Район			
	Майкорский	Ординский	Соликамский	Частинский
Более 10	0,0	0,0	0,0	0,0
10–5	0,0	0,0	0,0	0,0
5–2	0,7	0,03	2,1	0,3
2–1	2,2	0,02	12,5	0,5
1–0,5	4,5	0,01	10,7	0,7
0,5–0,25	4,9	0,09	13,5	1,5
0,25–0,1	7,8	0,24	7,5	3,5
Менее 0,1	79,8	99,61	53,7	93,5
Тип грунта по ГОСТ 25100-2020	Суглинок тяжелый пылеватый	Глина легкая пылеватая	Глина легкая песчанистая	Глина легкая пылеватая

По результатам испытаний, приведенным в табл. 1, можно сделать вывод об избыточном содержании влаги в грунте и охарактеризовать как слабый. Данный тип грунта не рекомендуется использовать в составе конструктива рабочего слоя земляного полотна автомобильной дороги без проведения дополнительных мероприятий по стабилизации [4].

Грунты с высоким содержанием глинистых частиц имеют предрасположенность к набуханию при повышении влажности. Было проведено множество исследований, посвященных вопросу стабилизации грунтов с использованием различных добавок. На сегодняшний день наиболее распространенным методом стабилизации считается использование цемента-грунтовой смеси [5–7].

Одним из подходов к решению этой проблемы может быть использование вторичных материалов и отходов промышленности.

В результате технологических процессов, проводимых предприятиями химической и горнодобывающей индустрии, наблюдается значительное накопление как жидких, так и твердых отходов. С учетом постоянного расширения производства калийных продуктов, внедрения новых технологических решений и увеличения производственных мощностей количество образующихся отходов стабильно возрастает. В результате такого роста производства площадь, занимаемая прудами-накопителями и солеотвалами, может достигать многих миллионов квадратных метров.

При производстве калийных удобрений на предприятии ООО «ЕвроХим – УКК» образуется два вида отходов – глинисто-солевые шламы и галитовые отходы. При производстве хлорида калия около 80 % извлекаемой руды после переработки идет в отвал в качестве галитовых отходов, глинисто-солевых шламов и рассолов.

Глинисто-солевые шламы представляют собой суспензию нерастворимого остатка в минерализованном растворе. Состав раствора, мас. %: KCl – 10–11; NaCl – 20–22. Твердая фаза – мелкодисперсная, в основном состоит из частиц размером 20 мкм.

Химический состав галитовых отходов производства представлен в табл. 3.

Таблица 3

Химический состав галитовых отходов производства хлористого калия на ООО «ЕвроХим – УКК»

Наименование	Твердая фаза – результаты измерений массовой доли, %						Массовая доля воды (после стадии обезвоживания), %
	KCl	H.O.	CaSO <sub>4</sub>	NaCl	MgCl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O кристаллической	
Среднее	1,9	2,95	1,85	93,1	0,09	0,11	6,0
Максимум	2,1	3,4	1,97	95,7	0,119	0,14	8,6
Минимум	1,7	2,6	1,66	92,5	0,047	0,05	4,8

*Примечание:* H.O. – нерастворимый осадок.

Нами был выполнен анализ исследований, посвященных изменениям физико-механических характеристик глинистых грунтов с добавлением хлорида натрия (NaCl) и хлорида калия (KCl).

В исследовании «Stabilization of expansive soil using potassium chloride», проведенном в Индии [8], авторы отмечают, что при добавлении хлорида калия в количестве 8–9 % от массы сухой смеси:

- на 20 % снижается предел платичности грунта (наибольший эффект снижения показателя выражен при добавлении 6–7 % KCl от массы смеси);
- 3 % увеличивается показатель максимальной плотности грунта (и снижается на 0,5 % при добавлении KCl в количестве от 9 до 12 % от массы смеси).

Для грунтов, смешанных с KCl, содержание воды может варьироваться от 0 до 15,70 % без какого-либо изменения объема грунта.

В исследовании «Stabilization of silty clay soil using chloride compounds» оценивались результаты смешивания илистого глинистого грунта с хлоридом натрия [9]. Испытания проводились по пределам Аттерберга с использованием аппарата Кассагранде в соответствии с международными стандартами ASTM (D423-66) (на предел текучести) и ASTM (D424-59) (на предел пластичности). На рис. 1 показано влияние содержания NaCl в смеси с илисто-глинистыми грунтами.

При добавлении NaCl в глинистый грунт происходит сжатие гидратной оболочки, частицы грунта становятся менее гидрофильными и появляется

возможность слипания соседних частиц [9–11]. В данном случае происходит гидрофобная коагуляция, вследствие чего уменьшается влажность на границе текучести, предел и число пластичности [2, 12]. Данное утверждение также подтверждается исследованием прочностных свойств засоленных глинистых грунтов, проведенным в 2013 г. учеными из Пермского государственного национального исследовательского университета [13].

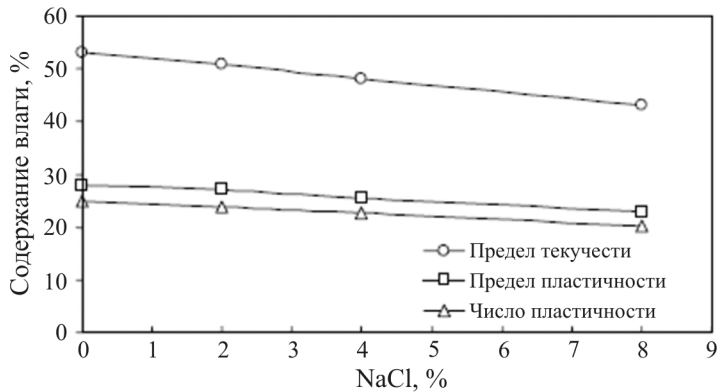


Рис. 1. Влияние содержания NaCl на влажность и свойства грунта [6]

Результаты испытаний на уплотнение, выраженные в зависимости между плотностью и содержанием влаги, представлены на рис. 2. Добавление NaCl в грунт увеличивало плотность и оптимальную влажность. Аналогичные результаты были получены в схожих исследованиях Frydman [14] и Wood [15]. Под действием динамического уплотнения частицы глинистого грунта становились более ориентированными, а плотность увеличивалась с увеличением содержания соли.

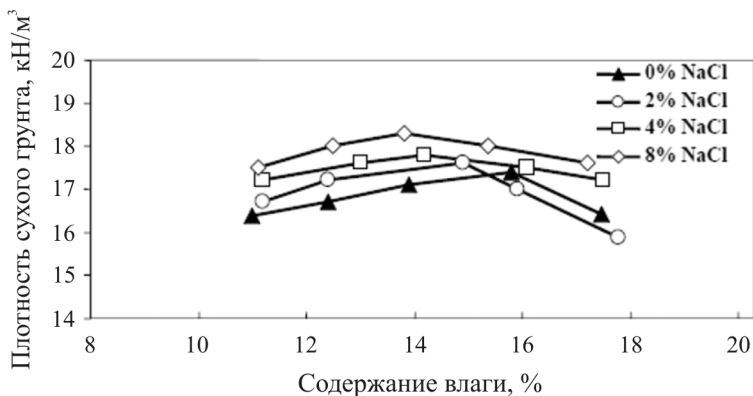


Рис. 2. Плотность смеси в зависимости от содержания влаги и NaCl [6]

**Выводы.** Территорию Пермского края можно рассматривать как область эффективного использования технологий укрепления грунта в строительстве автомобильных дорог. Это обусловлено наличием большого количества многотоннажных отходов химических, металлургических и горнодобывающих предприятий, складированных в шлакоотвалах и шламохранилищах, способных обеспечить улучшение физико-механических характеристик местных грунтов.

Использование отходов ООО «ЕвроХим – Усольский Калийный Комбинат», основываясь на зарубежном и отечественном опыте, может способствовать повышению межремонтных сроков автомобильных дорог, снизить себестоимость строительства за счет использования альтернативных материалов и использовать ресурсный потенциал промышленных отходов.

По результатам проведенного анализа, можно сделать следующие выводы о свойствах глинистых грунтов, стабилизированных отходами производства хлористого калия:

– наблюдается тенденция изменения физико-механических характеристик глинистых грунтов при смешении с KCl. Как показывает опыт зарубежных исследований, при добавлении KCl в объеме 8,5 % от массы смеси позволяет снизить предел пластичности (до 20 %) и увеличить плотность материала (до 3 % от максимального значения глинистого грунта);

– смесь глинистого грунта и NaCl может повлечь за собой изменение номенклатуры грунта (из глинистого – в суглинок) и увеличение показателей плотности материала.

Для практического применения подобных материалов необходимо разработать оптимальный состав смесей, отвечающих современным требованиям к строительным материалам. Подбор составов будет производиться в лаборатории на базе Пермского национального исследовательского политехнического университета.

#### Библиографический список

1. Дубов Д.В., Филиппова Е.В. К вопросу выбора технологии строительства автомобильных дорог на торфяных и глинистых грунтах // Велес. – 2019. – № 12-1(78). – С. 53–60.
2. John E. Sani, Roland Kufre Etim, Alexander Joseph. Compaction Behaviour of Lateritic Soil-Calcium Chloride Mixtures // Geotech Geol Eng. – 2018. – P. 1–20.
3. Копылов И.С. Геоэкология, гидрогеология и инженерная геология Пермского края [Электронный ресурс]: монография. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2021. – 501 с. – URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/mono/kopylov-Geoekologiya-gidrogeologiya-i-inzhenernaya-geologiya-Permskogo-kraya.pdf> (дата обращения: 04.04.2023).
4. Алькаев Е.Н., Лунёв А.А. Исследование влияния сосредоточенного внесения осушающих агентов на механическую прочность глинистого грунта // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 169–184.
5. Ramdane Bahar, Mouloud Benazzoug, Said Kenai. Durability of earth stabilized material // Key Engineering Materials. – 2014. – № 600. – P. 495–503.

6. Collapse and Swell of Lime Stabilized Ex-pansive Clays in Void Ratio-Moisture Ratio-Net Stress Space / Al-Taie Asmaa, M. Disfani, R. Evans, A. Arulrajah // *Int. J. Geomech.* – 2019. – № 19. – P. 1–15.
7. Слободчикова Н.А. Научные основы подбора состава грунтов, укрепленных известью // *Вестник науки и образования Северо-Запада России.* – 2017. – № 4. – С. 1–7.
8. Rajesh P.S., Niraj S.P., Ashok K.G. Stabilization of expansive soil using potassium chloride // *The Civil Engineering Journal.* – 2018. – № 3. – P. 25–33.
9. Tamadher T. Abood, Anuar Bin Kasa, Zamri Bin Chik. Stabilization of silty clay soil using chloride compounds // *Journal of Engineering Science and Technology.* – 2007. – Vol. 2, No. 1. – P. 102–110.
10. Fundamentals of soil stabilization / Firoozi Ali Akbar, Olgun C. Guney, Firoozi Ali Asghar, Baghini Mojtaba Shojaei // *International Journal of Geo-Engineering.* – 2017. – № 26. – P. 1–16.
11. Bhaskar C.S. Chittoori, Anand J. Puppala, Aravind Pedarla. Addressing Clay Mineralogy Effects on Performance of Chemically Stabilized Expansive Soils Subjected to Seasonal Wetting and Drying // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* – 2018. – P. 1–25.
12. Yi Dong, Ning Lu, Patrick J. Fox. Drying-Induced Consolidation in Soil // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* – 2020. – № 146 (9). – P. 1–14.
13. Исследование прочностных свойств засоленных глинистых грунтов / В.И. Каченов, А.О. Савченко, О.С. Ситева, А.К. Алванян // *Современные проблемы науки и образования.* – 2013. – № 6.
14. Frydman I.R., Ehrenreich T. Stabilization of heavy clay with potassium chloride // *Journal of Geotechnical Engineering.* – 1977. – P. 95–107.
15. Wood K.B. *Highway Engineering Handbook.* – McGraw Hill Company Inc., 1971. – Chapter 21.

### References

1. Dubov D.V., Filippova E.V. To the question of choice of technology of construction of highways on peat and clay soils // *Veles.* – 2019. – №12-1(78). – P. 53-60.
2. John E. Sani, Roland Kufre Etim, Alexander Joseph. Compaction Behaviour of Lateritic Soil-Calcium Chloride Mixtures // *Geotech Geol Eng.* 2018. P. 1–20.
3. Geoecology, hydrogeology and engineering geology of the perm region [Electronic resource]: monograph / I.S. Kopylov; Perm State University. – Electronic data. – Perm, 2021 – 39,5 Mb; 501 p. – Access mode: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/mono/kopylov-Geoekologiya-gidrogeologiya-i-inzhenernaya-geologiya-Permskogo-kraya.pdf>.
4. Alkaev E.N., Lunev A.A. Concentrated effect of drying agents on mechanical performance of clay soil // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture.* 2023. T.25. №3. С. 169-184.
5. Ramdane Bahar, Mouloud Benazzoug, Said Kenai. Durability of earth stabilized material // *Key Engineering Materials.* 2014. № 600. P. 495–503.
6. Asmaa Al-Taie, Disfani M., Evans R., Arulrajah A. Collapse and Swell of Lime Stabilized Expansive Clays in Void Ratio–Moisture Ratio–Net Stress Space // *Int. J. Geomech.* 2019. № 19. P. 1–15.
7. Slobodchikova N.A. Scientific basis for the selection of lime reinforced soils. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii.* 2017. (4): 1–7. (In Russian)
8. Rajesh P.S., Niraj S.P., Ashok K.G. Stabilization of expansive soil using potassium chloride // *The Civil Engineering Journal* 1. – 2018. – № 3. – P. 25-33.
9. Tamadher T. Abood, Anuar Bin Kasa, Zamri Bin Chik. Stabilization of silty clay soil using chloride compounds // *Journal of Engineering Science and Technology* Vol. 2, No. 1. – 2007. – P. 102-110.
10. Ali Akbar Firoozi, C. Guney Olgun, Ali Asghar Firoozi, Mojtaba Shojaei Baghini. Fundamentals of soil stabilization // *International Journal of Geo-Engineering.* 2017. № 26. P. 1–16.
11. Bhaskar C.S. Chittoori, Anand J. Puppala, Aravind Pedarla. Addressing Clay Mineralogy Effects on Performance of Chemically Stabilized Expansive Soils Subjected to Seasonal Wetting and Drying // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* 2018. P. 1–25.
12. Yi Dong, Ning Lu, Patrick J.Fox. Drying-Induced Consolidation in Soil // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* 2020. № 146 (9). P. 1–14.



13. Kachenov V.I., Savchenko A.O., Siyova O.S., Alvanyan A.K. Investigation of strength properties of salinized clay soils // Modern problems of science and education. – 2013. – №6.
14. Frydman I.R., Ehrenreich T. Stabilization of heavy clay with potassium chloride // Journal of Geotechnical Engineering 8. – 1977. – P. 95-107.
15. Wood K.B. Highway Engineering Handbook, Chapter 21 // McGraw Hill Company Inc. – 1971.

**I. Norin, K. Pugin**

## **STABILIZATION OF HEAVING SOILS USING POTASSIUM CHLORIDE**

Many regions of the Russian Federation are faced with the problem of a shortage of inert materials of the required quality, necessary for the repair, reconstruction and construction of new roads, especially in the conditions of work on the national project “Safe Quality Roads”. In this regard, research is being actively carried out on the development of effective compositions of alternative mixtures used in the construction of highway subgrades or the construction of flexible road pavements.

This article analyzes domestic and foreign studies that consider the possibility of using components included in the waste of EuroChem-Usolsky Potash Plant LLC (potassium chloride (KCl) and, to a greater extent, sodium chloride (NaCl)) as agents, affecting the physical and mechanical characteristics of clayey soils in the Perm region.

The use of halite waste, subject to mixing proportions, in the construction of highways provides the opportunity to increase the time between repairs and reduce the consumption of inert materials for constructing layers of road pavement bases. The negative impact of the environment on the structural layers of the highway is manifested in the creation of conditions for frost heaving of the soil, a decrease in bearing capacity due to increased humidity, changes in the structure of the soil and its freezing.

Using methods that influence the basic characteristics of soils, such as the use of halite waste from industrial production, it is possible to prevent or delay the destruction of road pavements by increasing the strength characteristics of the subgrade and foundations. This approach can reduce the volume of industrial waste disposed on the territory of enterprises, as well as reduce the cost of construction.

**Keywords:** highways, soil strengthening, clay soil, increasing strength, soil stability, industrial waste, halite waste.

**Норин Илья Олегович** (Пермь, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Автомобильные дороги и мосты», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: admnpipu@mail.ru).

**Пугин Константин Георгиевич** (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные технологии», Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова (Пермь, 614990, Петропавловская ул., 23); профессор кафедры «Специальности водного транспорта и управления на транспорте», Пермский филиал Волжского государственного университета водного транспорта (Пермь, 614060, бульвар Гагарина, 33, e-mail: 123zzz@rambler.ru).

**Илья Norin** (Perm, Russian Federation) – Graduate Student, Department of the Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: admnpipu@mail.ru).

**Konstantin Pugin** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Technologies, Perm State Agro-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov (23, Petropavlovskaya str., 614990, Perm); Professor of the Department

of Specialties of Water Transport and Transport Management, Perm Branch of the Volga State University of Water Transport (33, Gagarin boulevard, 614060, Perm, e-mail: 123zzz@rambler.ru).

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов** равноценен.

Поступила: 12.10.2023

Одобрена: 19.10.2023

Принята к публикации: 27.10.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Норин, И.О. Стабилизация пучинистых грунтов с помощью хлорида калия / И.О. Норин, К.Г. Пугин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2023. – № 3. – С. 78–87. DOI: 10.15593/2409-5125/2023.03.06

Please cite this article in English as: Norin I., Pugin K. Stabilization of heaving soils using potassium chloride. *PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urban development*, 2023, no. 3, pp. 78-87. DOI: 10.15593/2409-5125/2023.03.06