

Научная статья

DOI: 10.15593/24111678/2023.03.06

УДК 624.138

**Р.Р. Салахов**

НПФ «Криоген-Холод-Технология», Пермь, Российская Федерация

**ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ**

Представлены химические методы стабилизации глинистых грунтов. Осуществлен анализ физических, химических и микроструктурных изменений глинистых грунтов, обработанных различными химическими стабилизаторами, а также выявление подходящих методов укрепления глинистых грунтов на территории Пермского края. По завершении исследования было выявлено, что добавление нетрадиционных химических стабилизаторов, таких как шлак гранулированный доменный молотый и геополимер, обеспечивает увеличение прочности грунта, а также уменьшение его влагоемкости, в то время как добавки на основе кальция (цемент, известь) улучшают объемную стабильность и прочность глины. Процесс стабилизации, в первую очередь, зависит от пропорции добавки, минералогии глины, типа почвы, pH матрицы почвы, периода и температуры отверждения, а также присутствия вредных соединений (например, органических веществ и сульфатов). По сравнению с известью, обработанный цементом глинистый грунт обладает более высокой прочностью на сжатие, что связано с образованием дополнительных связующих соединений, тогда как известь обеспечивает лучшую удобоукладываемость. Таким образом, цемент является наиболее подходящим стабилизатором для зернистых и малопластичных грунтов, тогда как известь идеальна для высокопластичных грунтов, таких как экспансивная глина. Химические методы укрепления глинистых грунтов, представленные в статье, можно считать пригодными для использования в Пермском крае, так как на его территории широко распространены водонасыщенные глинистые грунты. На сегодняшний день является необходимым активное применение различных химических методов укрепления глинистых грунтов, а также разработка новых усовершенствованных технологий стабилизации грунтов данного типа.

**Ключевые слова:** стабилизация грунтов, известь, цемент, глинистый грунт, шлак доменный гранулированный, геополимер.

**R.R. Salakhov**

NPF Cryogen-Holod-Technology, Perm, Russian Federation

**CHEMICAL METHODS FOR STABILIZING CLAY SOILS**

The article presents chemical methods for stabilizing clay soils. The purpose of the article is to understand in detail the physical, chemical and microstructural changes in clay soils treated with various chemical stabilizers, as well as to identify suitable methods for strengthening clay soils in the Perm region. Upon completion of the study, it was found that the addition of non-traditional chemical stabilizers, such as granular ground blast-furnace slag and geopolymer, provides an increase in soil strength, as well as a decrease in its moisture capacity, while calcium-based additives (cement, lime) improve volumetric stability and strength clay. The stabilization process primarily depends on the proportion of the additive, the mineralogy of the clay, the type of soil, the pH of the soil matrix, the period and temperature of curing, and the presence of harmful compounds (eg organic matter and sulfates). Compared to lime, cemented clay soil has a higher compressive strength, which is associated with the formation of additional binder compounds, while lime provides better workability. Thus, cement is the most suitable stabilizer for granular and low-plastic soils, while lime is ideal for highly plastic soils such as expansive clay. The chemical methods for strengthening clay soils presented in the article can be considered suitable for use in the Perm region, since water-saturated clay soils are widespread on its territory. Today, it is necessary to actively use various chemical methods for strengthening clay soils, as well as the development of new improved technologies for stabilizing soils of this type.

**Keywords:** soil stabilization, lime, cement, clayey soil, granulated blast-furnace slag, geopolymer.

На сегодняшний день глинистые грунты являются широко распространенными на территории РФ, особенно в Пермском крае, что вызывает определенные трудности при строительстве и последующей эксплуатации автомобильных дорог. Основным сдерживающим фактором их использования при строительстве и обеспечении надежной несущей способности дорожных одежд является резкое снижение физико-механических характеристик при сезонном промерзании грунта. Дороги, возведенные на грунтах такого типа, подвержены неравномерным деформациям, которые возникают в результате морозного пучения и увеличения объема грунта при

промерзании. В связи с этим стабилизация глинистых грунтов добавками различного вида является актуальной задачей современной науки.

Стабилизация грунта – это геотехническая процедура, состоящая из механических, химических или других методов обработки, направленных на поддержание баланса, улучшение инженерных характеристик, ограничение водопоглощающей способности и улучшение сжимаемости обрабатываемого грунта [1–3]. Стабилизация грунта достигается за счет проведения нескольких геотехнических процедур, которые изменяют и улучшают состояние грунта в тех ситуациях, когда рекультивация грунта невозможна по техническим и экологическим причинам или не является экономически эффективной. Методы стабилизации грунта включают: повышение сопротивления разжижению, заполнение пустот, контроль деформаций, повышение прочности на сдвиг, повышение несущей способности, увеличение плотности, снижение пластичности грунта и ограничение способности к набуханию и усадке [4; 5].

Методы, используемые для стабилизации грунта, делятся на две основные категории: механическую (физическую) и химическую стабилизацию. Для укрепления глинистых грунтов обычно предпочтительнее использовать сочетание физико-химического метода. Методы механической стабилизации направлены на снижение набухания и потенциала расширения грунта без изменения его химического состава. К наиболее широко используемым механическим (физическим) методам, применяемым для стабилизации глинистого грунта, относятся уплотнение, предварительное увлажнение, циклы смачивания – сушки, армирование и т. д. [6; 7].

Химическая стабилизация проводится для придания устойчивости глинистым грунтам и улучшения их цементирующих свойств за счет снижения пластичности грунта, а также уменьшения способности к набуханию – усадке. Укрепление грунта химическими методами достигается путем внедрения в него в определенном количестве различных по своим составам химических стабилизаторов, которые подразделяются на традиционные и нетрадиционные. Химические методы укрепления грунтов с помощью традиционных стабилизаторов включают внедрение наиболее широко используемых добавок, таких как цемент, известь и летучая зола. Основу этих добавок составляет кальций, который вступает в химические реакции с водой, что приводит к увеличению прочности на сдвиг, уменьшению набухания и повышению устойчивости к циклам смачивания и высыхания грунта. В свою очередь, нетрадиционные химические стабилизаторы включают в себя известковую пыль, цементную пыль, сталелитейный шлак, измельченный гранулированный доменный шлак, отходы с содержанием оксида кальция (например, зольный шлак и макулатуру), сульфированные масла, полимеры, битумные эмульсии, и т.д. [8].

На рис. 1 представлена блок-схема общепринятых методов стабилизации глинистых грунтов, а также различные типы химических добавок, которые чаще всего применяются для укрепления грунтов.

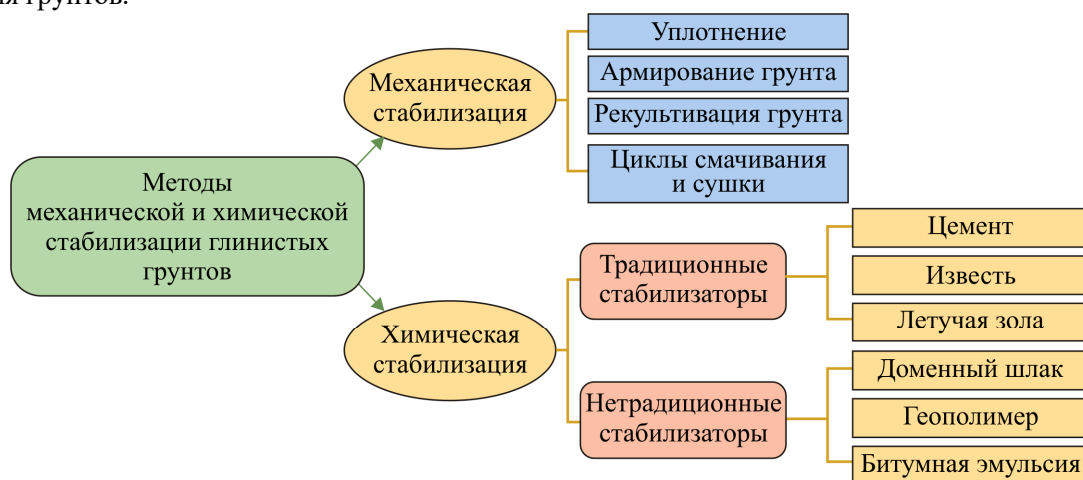
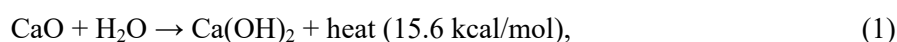


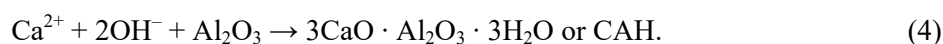
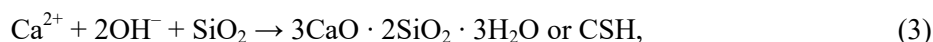
Рис. 1. Блок-схема общепринятых методов стабилизации глинистых грунтов

Многие ученые в своих исследованиях утверждают, что для глинистых грунтов наиболее подходящей является химическая стабилизация путем добавления извести. Основу химической теории, связанной с реакцией между известью и силикатными, алюминатными составляющими глинистых грунтов, составляют несколько факторов: катионный обмен, флокуляция, агломерация, пуццолановая реакция и карбонизация [8; 9]. Механизмы реакции можно разделить на две отдельные группы: модификация для снижения пластичности и затвердевание. Модификация происходит в результате флокуляции и активности катионного обмена, тогда как затвердевание осуществляется при пуццолановой реакции. Оба этих механизма способствуют физическим, химическим, минералогическим и микроструктурным изменениям в обработанных стабилизированных глинистых грунтах.

Добавление воды к извести приводит к экзотермической реакции, в результате которой образуется гашеная известь ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Выработка дополнительного тепла (15,6 ккал/моль) способствует снижению естественной влажности почвы. Кроме того, при растворении в воде  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  распадается на ионы  $\text{OH}^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$ , как показано в следующих уравнениях [1]:



Ионы  $\text{Ca}^{2+}$  замещают существующие одновалентные катионы почвенных минералов и вызывают увеличение силы межчастного притяжения. В результате толщина диффузного двойного слоя глинистых частиц значительно уменьшается. Если притяжение несколько превышает отталкивание, отрицательный заряд на поверхностях глины притягивает положительные заряды на их краях, что приводит к флокуляции. Изменение толщины диффузного двойного слоя и флокуляция делают грунт благоприятным для строительства за счет снижения его пластичности и способности к набуханию. Во второй фазе ионы  $\text{OH}^-$ , выделяющиеся из гашеной извести, образуют щелочную почвенную матрицу, что приводит к растворению присутствующих в ней кремнезема и глинозема. В среде с высоким рН кремнезем и глинозем из глиняных решеток становятся растворимыми и реагируют с ионами  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{OH}^-$ , образуя вяжущие соединения, такие как гидрат силиката кальция (CSH) и гидрат алюмината кальция (CAN) соответственно. Данные соединения называются пуццолановой реакцией, как подробно описано ниже [1]:



Они прочно связывают частицы глины, обеспечивая долгосрочное повышение их прочности на сдвиг, стабильности и несущей способности.

Помимо извести, наиболее известной химической добавкой является обычный портландцемент, который представляет собой мелкозернистое гетерогенное соединение, состоящее из четырех различных оксидов, таких как трикальцийсиликат (C3S), дикальцийсиликат (C2S), трикальцийалюминат (C3A) и тетракальцийалюмоферрат ((C4) AF), где С – CaO, S – SiO<sub>2</sub>, А – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, F – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Н – H<sub>2</sub>O. Хотя механизмы стабилизации извести и цемента почти идентичны, цемент используется чаще из-за его доступности и относительно более высоком улучшении прочности на сжатие. Механизм стабилизации состоит из гидратации, катионного обмена, флокуляции и пуццолановой реакции [10]. При смешивании глины с цементом и водой гидратация происходит немедленно, так как C3S и C2S, находящиеся в цементе, реагируют с водой и высвобождают ионы кальция в глинистый грунт, и, таким образом, образуется такое вяжущее соединение, как CSH. Кроме того, это соединение также образует гидрат кальция и алюминия. Данные цементные продукты гидратации являются желеобразными и очень быстро способствуют значительному повышению прочности грунта. Механизм увеличения прочности за счет гидратации цемента показан на рис. 2.

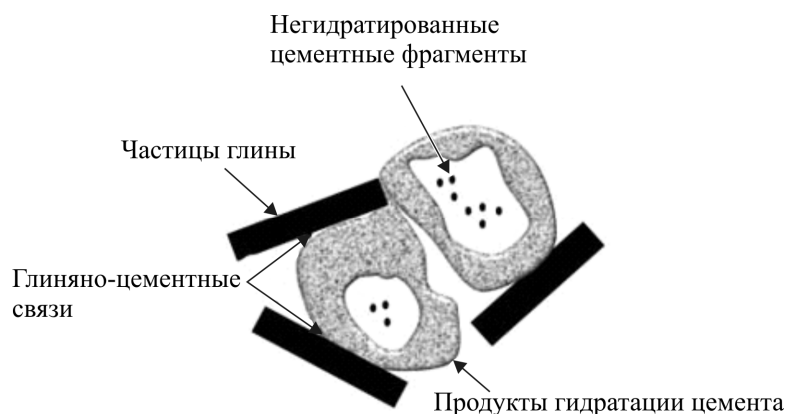


Рис. 2. Механизм набора прочности грунта за счет продуктов гидратации цемента [1]

Данный процесс является экзотермическим. Высвобождаемое тепло имеет тенденцию к увеличению исходного содержания влаги и температуры отверждения. Кроме того, гашеная известь ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), образующаяся при гидратации  $\text{C}_3\text{S}$  и  $\text{C}_2\text{S}$ , распадается на ионы  $\text{OH}^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$ , впоследствии ионы  $\text{Ca}^{2+}$  способствуют флокуляции грунта. Он также реагирует с пуццолановыми материалами, такими как кремний и оксид алюминия, присутствующими в почве. Следовательно, образуются вяжущие соединения, что приводит к усилению связей между частицами и к повышению производительности грунтовой массы [11]. Из этого следует, что из-за образования дополнительного цементирующего геля грунт, стабилизированный цементом, проявляет более высокую устойчивость к внешним нагрузкам, чем грунт, укрепленный известью. Кроме того, при добавлении цемента пластичность грунта, предел его текучести, а также его способность к набуханию значительно снижаются, тогда как предел усадки и прочность грунта увеличиваются.

Шлак доменный гранулированный молотый (ШДГМ) представляет собой продукт, получаемый при тонком измельчении гранулированного доменного шлака совместно с гидрофобной добавкой. Вяжущие свойства мелкозернистого шлака делают его подходящей заменой цемента или извести при стабилизации глинистого грунта. Добавление ШДГМ увеличивает размер и удельный вес частиц почвы, вызывает немедленное снижение потенциала набухания грунта, а также обеспечивает значительное улучшение прочности на сжатие глинистого грунта [12; 13]. Кроме того, ШДГМ выступает в качестве эффективного вяжущего, добавляемого для обеспечения лучшей стабилизации сульфатосодержащих почв.

Геополимер – это неорганический материал, который представлен как инновационное и экологически чистое вяжущее для стабилизации глинистых грунтов. Он представляет собой сеть алюмосиликатов, состоящую из оксида алюминия ( $\text{AlO}_4$ ) и кремнезема ( $\text{SiO}_4$ ), попеременно соединенных общими атомами  $\text{O}_2$ . Образец глинистого грунта, который содержит в себе 20 % геополимера, создает значительное количество искусственных связей, которые снижают значение сдвига при деградации почвы, а также уменьшают влагоёмкость грунта [14; 15]. Таким образом, обработанный геополимером грунт может быть пригоден для укрепления систем динамической нагрузки, таких как автомагистрали и железные дороги.

Таким образом, представлен подробный обзор исследований влияния химических добавок, таких как известь, цемент, а также некоторых нетрадиционных стабилизаторов на укрепление глинистых грунтов. Основной целью данного исследования являлось детальное понимание физических, химических и микроструктурных изменений глинистых грунтов, обработанных добавками, а также выявление подходящих методов стабилизации глинистых грунтов на территории Пермского края. На основании представленного аналитического исследования можно сделать вывод, что добавление нетрадиционных химических стабилизаторов, таких как ШДГМ и геополимер, обеспечивает увеличение прочности грунта, а также уменьшение его влагоемкости, в то время как добавки на основе кальция (цемент, известь) улучшают объемную стабильность и прочность глины. Процесс стабилизации, в первую очередь, зависит от пропорции добавки, минералогии глины, типа почвы, pH матрицы почвы, периода и температуры от-

верждения, а также присутствия вредных соединений (например, органических веществ и сульфатов). По сравнению с известью, обработанный цементом глинистый грунт обладает более высокой прочностью на сжатие, что связано с образованием дополнительных связующих соединений, тогда как известь обеспечивает лучшую удобоукладываемость. Таким образом, цемент является наиболее подходящим стабилизатором для зернистых и малопластичных грунтов, тогда как известь идеальна для высокопластичных грунтов, таких как экспансивная глина. Химические методы укрепления глинистых грунтов, представленные в статье, можно считать пригодными для использования в Пермском крае, так как на его территории широко распространены водонасыщенные глинистые грунты, которые вызывают определенные трудности при возведении, а также последующей эксплуатации автомобильных дорог. Данный факт говорит о том, что на сегодняшний день, является необходимым активное применение различных химических методов укрепления глинистых грунтов, а также разработка новых усовершенствованных технологий стабилизации грунтов данного типа.

### Список литературы

1. Barman D., Dash S.K. Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2022. – Vol. 14. – P. 1319–1342.
2. Получение экологически безопасных строительных материалов на основе отработанного формовочного песка сталелитейного производства / Я.И. Вайсман, К.Г. Пугин, Л.В. Рудакова, И.С. Глушанкова, К.Ю. Тюрюханов // *Теоретическая и прикладная экология*. – 2018. – № 3. – С. 109–115.
3. Тюрюханов К.Ю., Пугин К.Г. Влияние поверхности частиц отработанной формовочной смеси на процессы структурообразования асфальтобетона // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. – 2019. – Т. 9, № 3 (30). – С. 566–577.
4. Пугин К.Г., Пугина В.К. Разработка технологии использования отходов пластика в дорожном строительстве // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. – 2020. – № 3. – С. 21–28.
5. Пугин К.Г., Юшков В.С. Строительство автомобильных дорог с использованием техногенных материалов // *Вестник Пермского государственного технического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности*. – 2011. – № 1. – С. 35–43.
6. Пугин К.Г., Калинина Е.В. Использование отходов предприятий химической и металлургической отрасли для изготовления асфальтобетонных дорожных покрытий // *Экология и промышленность России*. – 2011. – № 10. – С. 28–30.
7. Пугин К.Г., Вайсман Я.И. Методические подходы к разработке технологий совместного использования разнородных отходов производства // *Вестник МГСУ*. – 2014. – № 5. – С. 78–90.
8. Al-Mukhtar M., Lasledj A., Alcover. J.F. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C // *Applied clay Science*. – 2010. – Vol. 50, № 2. – P. 191–198.
9. Bell F.G. Lime stabilization of clay minerals and soils // *Engineering geology*. – 1996. – Vol. 42, № 4. – P. 223–237.
10. Abbas Z.H., Majdi H.S. Study of heat of hydration of Portland cement used in Iraq // *Case Studies In Construction Materials*. – 2017. – № 7. – P. 154–162.
11. Abdullah H.H., Shahin M.A. Cyclic behaviour of clay stabilised with fly-ash based geopolymer incorporating ground granulated slag // *Transportation Geotechnics*. – 2021. – Vol. 26. – P. 2812–2819.
12. Celik E., Nalbantoglu Z. Effects of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) on the swelling properties of lime-stabilized sulfate-bearing soils // *Engineering Geology* – 2013. – Vol. 163. – P. 20–25.
13. Cocka E., Yazici V., Ozaydin V. Stabilization of Expansive Clays Using Granulated Blast Furnace Slag (GBFS) and GBFS-Cement // *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2009. – Vol. 27. – P. 489–499.
14. Sinha P., Iyer K.R. Effect of Stabilization on Characteristics of Subgrade Soil: A Review // *Advances in Computer Methods and Geomechanics*. – 2020. – Vol. 55. – P. 667–682.
15. Pooni J., Robert D., Giustozzi F. Stabilisation of expansive soils subjected to moisture fluctuations in unsealed road pavements // *International Journal of Pavement Engineering*. – 2022. – Vol. 23, № 3. – P. 558–570.

## References

1. Barman D., Dash S.K. Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, Vol. 14, pp. 1319-1342.
2. Vaysman YA.I., Pugin K.G., Rudakova L.V., Glushankova I.S., Tyuryukhanov K.YU. Polucheniye ekologicheskii bezopasnykh stroitel'nykh materialov na osnove otrabotannogo formovochnogo peska staleliteynogo proizvodstva [Obtaining environmentally friendly building materials based on spent foundry sand from steel production]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2018, no. 3, pp. 109–115.
3. Tyuryukhanov K.YU., Pugin K.G. Vliyaniye poverkhnosti chastits otrabotannoy formovochnoy smesi na protsessy strukturnoobrazovaniya asfal'tobetona [Influence of the surface of the particles of the spent molding sand on the processes of structure formation of asphalt concrete]. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*, 2019, Vol. 9, no. 3 (30), pp. 566-577.
4. Pugin K.G., Pugina V.K. Razrabotka tekhnologii ispol'zovaniya otkhodov plastika v dorozhnom stroitel'stve [Development of technology for the use of plastic waste in road construction]. *Transport. Transportnyye sooruzheniya. Ekologiya*, 2020, no. 3, pp. 21-28.
5. Pugin K.G., Yushkov V.S. Stroitel'stvo avtomobil'nykh dorog s ispol'zovaniyem tekhnogennykh materialov [Construction of roads using man-made materials]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhayushchey sredy, transport, bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2011, no. 1, pp. 35-43.
6. Pugin K.G., Kalinina Ye.V. Ispol'zovaniye otkhodov predpriyatiy khimicheskoy i metallurgicheskoy otrasli dlya izgotovleniya asfal'tobetonnykh dorozhnykh pokrytiy [Use of waste from enterprises of the chemical and metallurgical industries for the manufacture of asphalt concrete pavements]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2011, no. 10, pp. 28-30.
7. Pugin K.G., Vaysman YA.I. Metodicheskiye podkhody k razrabotke tekhnologiy sovmestnogo ispol'zovaniya raznorodnykh otkhodov proizvodstva [Methodological approaches to the development of technologies for the joint use of heterogeneous production waste]. *Vestnik MGSU*, 2014, no. 5, pp. 78-90.
8. Al-Mukhtar M., Lasledj A., Alcover. J.F. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C. *Applied clay Science*, 2010, Vol. 50, no. 2, pp. 191-198.
9. Bell F.G. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering geology*, 1996, Vol. 42, no. 4, pp. 223-237.
10. Abbas Z.H., Majdi H.S. Study of heat of hydration of Portland cement used in Iraq. *Case Studies In Construction Materials*, 2017, no. 7, pp. 154-162.
11. Abdullah H.H., Shahin M.A. Cyclic behaviour of clay stabilised with fly-ash based geopolymer incorporating ground granulated slag. *Transportation Geotechnics*, 2021, Vol. 26, pp. 2812–2819.
12. Celik E., Nalbantoglu Z. Effects of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) on the swelling properties of lime-stabilized sulfate-bearing soils // *Engineering Geology*, 2013, Vol. 163, pp. 20-25.
13. Cocka E., Yazici V., Ozaydin V. Stabilization of Expansive Clays Using Granulated Blast Furnace Slag (GBFS) and GBFS-Cement. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2009, Vol. 27, pp. 489- 499.
14. Sinha P., Iyer K.R. Effect of Stabilization on Characteristics of Subgrade Soil: A Review. *Advances in Computer Methods and Geomechanics*, 2020, Vol. 55, pp. 667-682.
15. Pooni J., Robert D., Giustozzi F. Stabilisation of expansive soils subjected to moisture fluctuations in unsealed road pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 2022, Vol. 23, no. 3, pp. 558-570.

## Об авторе

**Салахов Рафаэль Рафисович** (Пермь, Российская Федерация) – инженер-технолог, НПФ «Криоген-Холод-Технология» (Российская Федерация, 614101, Пермь, ул. Автозаводская, 9а, e-mail: salaxovrafael1993@mail.ru).

## About the author

**Rafael R. Salakhov** (Perm, Russian Federation) – Process Engineer, NPF Cryogen-Holod-Technology LLC (9a, Avtozavodskaya st., Perm, 614101, Russian Federation, e-mail: salaxovrafael1993@mail.ru).

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

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад автора** 100 %.

Поступила: 22.05.2023

Одобрена: 15.06.2023

Принята к публикации: 21.06.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Салахов, Р.Р. Химические методы стабилизации глинистых грунтов / Р.Р. Салахов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2023. – № 3. – С. 59–64. DOI: 10.15593/24111678/2023.03.06

Please cite this article in English as: Salakhov R.R. Chemical methods for stabilizing clay soils. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2023, no. 3, pp. 59-64. DOI: 10.15593/24111678/2023.03.06