

УДК 544.7; 624.138.4

ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ



CHEMICAL METHODS FOR SOIL STABILIZATION

Шлычко Ростислав Сергеевичстудент,
Кубанский государственный технологический университет**Тлехусеж Марина Александровна**кандидат химических наук,
доцент кафедры химии,
Кубанский государственный технологический университет
mtlehusezh@mail.ru**Shlichko Rostislav Sergeevich**Student,
Kuban State Technological University**Tlehusezh Marina Alexandrovna**Candidate of Chemical Sciences,
Associate Professor
of the Department of Chemistry,
Kuban State Technological University
mtlehusezh@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются специальные технологии, основанные на использовании химических реагентов для изменения физико-механических свойств грунтового основания. Анализируются факторы, требующие применения этих методов, включая слабый несущий слой грунта, необходимость увеличения несущей способности и снижения воздействия на окружающую среду. Описаны основные случаи использования химических методов: грунтовую стабилизацию с применением различных добавок и эрозионную защиту. Работа представляет собой обзор физико-химических процессов, которые происходят при укреплении грунтов, и их влияние на устойчивость и прочность грунтового основания.

Ключевые слова: укрепление грунтов, несущая способность, устойчивость, деформации грунта.

Annotation. The article discusses special technologies based on the use of chemical reagents to change the physical and mechanical properties of the soil base. The factors requiring the use of such methods are analyzed, including a weak bearing layer of soil, the need to increase the bearing capacity and reduce environmental impact. The main cases of using chemical methods are described: soil stabilization with the use of various additives and erosion protection. The work provides an overview of the physico-chemical processes that occur during soil strengthening, and their impact on the stability and strength of the soil base.

Keywords: chemical methods, soil reinforcement, load-bearing capacity, stability, deformation of soil.

Химические методы укрепления грунтов – это специальные технологии, основанные на использовании химических реагентов для изменения физико-механических свойств грунтового основания. Такие методы используются для улучшения несущей способности грунтов, повышения их устойчивости к нагрузкам, а также уменьшения деформаций и оседаний в грунтовом основании. Они широко применяются в строительстве для увеличения надёжности и долговечности сооружений. Повышение несущей способности грунта позволяет снизить риск деформаций и обеспечить стабильность зданий [1]. Физико-химические процессы лежат в основе грунтовой стабилизации, эрозионной защиты, грунтовой консолидации, защиты от скольжения, замораживания, придания гидрофобных свойств, регулирования фильтрации воды, а также уплотнения грунтов.

Грунтовая стабилизация включает в себя использование различных химических добавок, в т.ч. цемента, извести, глинозема, полимеров для повышения прочности и устойчивости грунтов. Они реагируют с грунтовыми частицами, образуют прочные связи, делая грунт более устойчивым.

Эрозионная защита применяется для предотвращения или замедления эрозии грунта. Применение полимеров и геотекстиля способствует удержанию почвы во время дождей или при ветровом воздействии.

Грунтовая консолидация может быть достигнута путем инъекции в грунт различных химических реагентов, например, силикатов, карбонатов, алюминатов и др. Эти вещества образуют прочные связи с грунтовыми частицами, что приводит к уплотнению грунта и повышению его несущей способности.

Защита от скольжения. Физико-химические процессы играют важную роль в предотвращении скольжения грунтов на склонах или во время строительства подземных инфраструктур. В частности, добавление полимеров, битумов, смол улучшает

устойчивость склона за счет сцепления между грунтовыми частицами. Высокомолекулярные вещества, цемент и латекс способны проникать в грунтовую матрицу, повышая устойчивость грунта и его способность переносить нагрузки.

Замораживание грунта. Антифризы, или жидкости для замораживания грунта, используются для создания временного замороженного слоя. Это позволяет проводить строительные работы под водой или в мягких грунтах.

Улучшение водоотталкивающих свойств. Гидрофобизаторы применяются для повышения водонепроницаемости грунта, создания барьеров от проникновения влаги и предотвращения размывания грунта в результате дождя. Они делятся на три вида.

1. Силиконовые гидрофобизаторы, к которым относятся кремнийорганические соединения – диметикон, силиконовая эмульсия или силоксаны.

2. Битумные гидрофобизаторы – битумные эмульсии или расплавленный битум, смешанный с минеральными наполнителями и другими добавками.

3. Полимерные гидрофобизаторы – смолы, содержащие акриловые, винилхлоридные или полиуретановые соединения.

Уплотнение грунта. Высокой водоотталкивающей способностью обладают глинистые вяжущие материалы. К ним относятся бентонитовые глины, которые используются для укрепления грунта в подземных сооружениях, туннелях и шахтах, а также ксантогениты, образуемые при взаимодействии глины с органическими соединениями. Эти вещества применяются для укрепления конструкций на слабых грунтах или создания фундаментов [2].

Фильтрация. Некоторые полимеры и глинистые вещества используются для создания фильтрационных барьеров в грунте. Бентонитовые глины способны создавать эффективные фильтрационные барьеры. Ксантогениты позволяют перехватывать и задерживать токи воды.

Инъекции полимерных реагентов. Полиакриламиды и полиуретаны вводятся в грунт с помощью специального оборудования. Они проникают в поры грунта и образуют полимерную матрицу, которая увеличивает его прочность и устойчивость. Полиакриламиды могут реагировать с водой в грунте, образуя гелеподобную структуру, которая повышает его прочность. Полиуретаны образуют полимерную матрицу в грунте, укрепляя его и повышая устойчивость. При строительстве тоннелей или метро для предотвращения разрушения и подтопления можно использовать инъекционное укрепление грунта. Например, при строительстве двух автодорожных тоннелей в песчаной насыпи под главными железнодорожными путями направления ст. Пермь-II – ст. Свердловск использовался описываемый метод, чтобы предотвратить просачивание воды и обеспечить безопасность проекта [3].

Использование цементных реагентов. Портландцемент, который обладает хорошими связующими свойствами и способен образовывать прочные соединения с грунтом, или цементная смесь вводятся в грунт с целью образования цементного матрикса. Цементные реагенты реагируют с влагой грунта, образуя твердую и прочную связь между грунтовыми частицами [4].

Применение грунтовых смесей. Грунтовая смесь состоит из грунта, цемента, песка, глины и т.д. Грунтовая смесь укрепляется путем компактации (сжатия породы под воздействием давления) и затвердевания, что повышает прочность и устойчивость. В основе лежат процессы гидратации цемента, образования минеральных гелей, а также реакции между глиной и другими компонентами смеси. Гидратация цемента способствует образованию кристаллических структур, которые объединяют грунтовые частицы.

Применение глинисто-гравийных грунтов. Технология укрепления глинисто-гравийных и песчаных грунтов автомобильных дорог с применением пластиковых отходов позволяет улучшить прочностные характеристики грунтовых дорожных оснований, а также утилизировать отходы пластмасс с сохранением их материального ресурса, что снижает негативное воздействие пластиковых отходов на объекты окружающей среды. Данная технология не требует организации сложной технологической линии по подготовке отходов и значительного расхода энергии на подготовку отходов пластмасс

к использованию. При этом не образуется вторичной эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу [5].

Химические реагенты для повышения прочности и устойчивости грунтового основания. Грунтовые упрочняющие добавки (цемент, силикаты и полимеры) повышают прочность и устойчивость грунтового основания путем изменения физических и химических свойств грунта. Они вносятся в виде порошков, жидкостей или гранул с использованием сухого внедрения или инъекции. Цемент реагирует с водой, образуя твердую и прочную структуру из грунтовых частиц. Силикаты повышают прочность, а полимеры, реагируя с грунтом, формируют полимерную матрицу, улучшающую его устойчивость и прочность [6], выполняют функции гидрофобизирующих поверхностно-активных веществ. Применение химических реагентов для изменения свойств грунтов требует проведения тщательных исследований и тестов с целью выявления их оптимальной комбинации и методов использования. Кроме того, необходимо учитывать возможные негативные воздействия на окружающую среду и здоровье людей.

В качестве поверхностно-активных веществ хорошо себя зарекомендовали производные аминокислотной и аминокислотной кислот, синтезированные на кафедре химии КубГТУ [7]. Полезные свойства этих соединений разнообразны, что позволило разработать на их основе кроме ПАВ, еще и биологически активные вещества с фармакологической [8] и рострегулирующей активностью [9, 10].

Одним из эффективных, но слабо разработанных методов улучшения механических свойств грунтов, является *устройство известковых свай*, которое выполняется в шахматном порядке. Первоначальный грунт уплотняется при забивке в него трубы с закрытым концом. Известь засыпается в образовавшуюся скважину с послойным уплотнением, где при взаимодействии с поровой водой происходит ее гашение: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2 + 15,5 \text{ ккал}$. Выделяющееся при этом тепло расходуется на испарение влаги из известкового раствора, способствуя его быстрому твердению и высыханию. В результате реакции химическая свая способна увеличиваться в объеме, дополнительно уплотняя грунт вокруг. Происходит проникновение гидроксида кальция в грунтовую массу в результате диффузии. Следом за реакцией гидратации в системе «грунт–известь» происходят реакции катионного обмена. Пересыщенный раствор $\text{Ca}(\text{OH})_2$ способствует насыщению грунта катионами кальция взамен натрия или водорода. В результате дальнейшего взаимодействия между CaO , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и активными кремнеземом и глиноземом в грунтах формируются устойчивые соединения типа гидросиликатов ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) и гидроалюмосиликатов ($(\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2) \cdot \text{R} \cdot \gamma \text{H}_2\text{O}$). Гелеобразные продукты данных реакций действуют в качестве клея, существенно повышая прочность произвесткованного грунта [11].

Геосинтетические материалы широко применяются в строительстве дорог, аэропортов, дамб, резервуаров и других инфраструктурных объектов. Геотекстиль используется для укрепления грунта, предотвращения его смыва и образования трещин. Геосетки состоят из прочных волокон, которые образуют сетчатую структуру и применяются для укрепления грунта, создания разделительных слоев и защиты от эрозии. Геомембраны используются для создания водонепроницаемых барьеров в грунте, предотвращающих проникновение воды и загрязнений в грунт и защищающих окружающую среду. Геокомпозиаты состоят из двух или более слоев геосинтетических материалов, объединенных вместе и обладающих комбинированными свойствами. Они могут использоваться для укрепления грунта, создания разделительных слоев и защиты от эрозии [12].

В различных отраслях находят применение пластифицирующие добавки, которые можно использовать и при укреплении грунтов. К ним относятся сульфенированное меламинформальдегидное соединение (СМФ), сульфенированное нафталинформальдегидное соединение (СНФ), лигносульфонат технический (ЛСТ), поликарбонат (ПКС) [13]. Исследованиями установлено, что добавка ПКС к портландцементу повышает плотность грунта, но не в чистом виде (данный пластификатор не обеспечивает коэффициент морозостойкости). Хорошие результаты показали компоненты, полученные окислением отходов сульфитного производства целлюлозы [14].

Химические методы укрепления грунтов обладают рядом преимуществ, способствуя увеличению прочности особенно при строительстве зданий и дорог, а также устойчивости при неблагоприятных условиях, например, затоплении или землетрясении. Благодаря химическим реагентам улучшается дренирование грунта, повышается его проницаемость и способность справляться с излишней влагой. В результате сокращается время и затраты на строительство, т.к. химические реагенты позволяют применять имеющийся грунт и не искать ему замену.

В то же время химические методы укрепления грунтов имеют ряд недостатков. Для грунтов и условий окружающей среды с определенными свойствами рекомендуются другие методы укрепления. Необходимость высокотехнологичного оборудования и квалифицированного персонала повышает стоимость проекта и сложность его реализации. Некоторые реагенты могут оказывать негативное влияние на почвенные, подземные воды, животный и растительный мир.

Химические методы укрепления грунтов полезны в условиях, когда уровень грунтовых вод высок, грунты слабы или несжимаемы, или при строительстве на мягких и неустойчивых почвах. Однако для достижения оптимальных результатов часто необходимо комбинировать химические методы с другими технологиями, такими как механическое уплотнение грунтов, использование геосинтетических материалов, создание специальных фундаментов или конструкций. Комбинирование позволяет улучшить грунтовое основание и обеспечить его долговечность и устойчивость к нагрузкам и внешним воздействиям. Правильный выбор и применение химических методов, а также их сочетание с другими технологиями, требует тщательного инженерного проектирования, анализа грунтовых условий и особенностей строительного проекта. Применение специальных химических реагентов для изменения свойств грунтов – это один из методов геотехнического инжиниринга, который позволяет улучшить грунтовые свойства для различных инженерных целей.

Литература

1. Смогулова Л.К. Химическое закрепление грунтов / Л.К. Смогулова // Символ науки. – 2017. – № 6. – С. 28–31. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/himicheskoe-zakreplenie-gruntov/viewer> (дата обращения 26.12.2023).
2. Буланов П.Е. Модификация укрепленных портландцементом глинистых грунтов для дорожных одежд комплексной гидрофобно-пластифицирующей добавкой : автореф. дис. ... на соиск. учен. степ. канд. технич. наук (05.23.05) / Буланов Павел Ефимович; доктор технических наук, профессор ФГКВУ ВО. – Казань, 2017. – С. 11–12.
3. Малинин А.Г. Предварительное инъекционное закрепление железнодорожной насыпи при строительстве автодорожных тоннелей в Перми / А.Г. Малинин // Подземное пространство мира. – 2000. – № 5. – С. 23–25. – URL : https://studylib.ru/doc/2618957/predvaritel._noe-inekcionnoe-zakreplenie-gruntov-pri.html (дата обращения 26.12.2023).
4. Махмутов М.М. О качестве уплотнения грунтов земляного полотна / М.М. Махмутов, Р.Л. Сахапов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 2. – С. 1–5. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/o-kachestve-uplotneniya-gruntov-zemlyanogo-polotna/viewer> (дата обращения 26.12.2023).
5. Салахов Р.Р. Укрепление грунтов, используемых для строительства автомобильных дорог, отходами пластика / Р.Р. Салахов // Transport. Transport Facilities. Ecology. – 2023. – № 1. – С. 20–23.
6. Федулов А.А. Применение поверхностно-активных веществ (стабилизаторов) для улучшения свойств связных грунтов в условиях дорожного строительства : автореф. дис. ... на соиск. учен. степ. канд. технич. наук (05.23.11) / Федулов Андрей Александрович; доктор технических наук, профессор. – М., 2005. – С. 20–21.
7. Тлехусеж М.А. Применение доступных экологически безопасных смазочно-охлаждающих жидкостей для обработки металлов резанием / М.А. Тлехусеж, Л.Н. Сороцкая // Современная экология: образование, наука, практика: материалы Международной научно-практической конференции, Воронеж, 04–06 октября 2017 года. – Воронеж : Издательство «Научная книга», 2017. – Т. 2. – С. 477–479.
8. Синтез и противомикробная активность новых карбомилоилсодержащих окса(тиа)золидинов и 3-диалкиламинобутанамидов / М.А. Тлехусеж, Л. А. Бадовская, Г.А. Александрова, З.И. Тяхтенева // Химико-фармацевтический журнал. – 1999. – Т. 33. – № 3. – С. 28–29.

9. Патент № 2797172 C1 Российская Федерация, МПК A01N 37/18, A01N 37/22, A01P 21/00. Активатор прорастания семян озимой пшеницы, содержащий мочевиновый фрагмент: № 2022131748: заявл. 06.12.2022: опублик. 31.05.2023 / М.А. Тлехусеж; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет».
10. Тлехусеж М.А. Синтез гетарил-1,3-оксазолидинов, обладающих ростовой активностью / М.А. Тлехусеж, Л.А. Бадовская // Тезисы докладов Кластера конференций по органической химии «ОргХим-2016», Санкт-Петербург, 27 июня – 01 июля 2016 года. – СПб. : ООО «Издательство ВВМ», 2016. – С. 463.
11. Гравис М.В. Химические сваи как метод упрочнения массивов водонасыщенных глинистых грунтов / М.В. Гравис, Е.Н. Самарин, А.П. Пензев // Материалы пятой Общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве» Москва, 28 апреля 2023 года. – М. : Издательский дом «Тэсэра», 2023. – С. 97–102.
12. Нурутдинов Э.Г. Применение геосинтетических материалов в дорожном строительстве / Э.Г. Нурутдинов // Материалы XIV Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». – URL : <https://scienceforum.ru/2022/article/2018030859> (дата обращения 26.12.2023).
13. Бузулуков В.И. Разработка эффективных материалов для строительства на основе отходов деревообрабатывающей, целлюлознобумажной и микробиологической промышленности : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пенза, 2007. – 42 с.
14. Буланов П.Е. Модификация укрепленных портландцементом глинистых грунтов для дорожных одежд комплексной гидрофобнопластифицирующей добавкой : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 2017. – 20 с.

References

1. Smogulova L.K. Chemical consolidation of soils / L.K. Smogulova // Symbol of science. – 2017. – № 6. – P. 28–31. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/himicheskoe-zakreplenie-gruntov/viewer> (date of application 12/26/23).
2. Bulanov P.E. Modification of clay soils strengthened with Portland cement for road pavements with a complex hydrophobic-plasticizing additive : abstract of thesis. dis. ... for the job application scientist step. Ph.D. technical Sciences (05.23.05) / Bulanov Pavel Efimovich; Doctor of Technical Sciences, Professor of the Federal State Educational Institution of Higher Education. – Kazan, 2017. – P. 11–12.
3. Malinin A.G. Preliminary injection consolidation of the railway embankment during the construction of road tunnels in Perm / A.G. Malinin // Underground space of the world. – 2000. – № 5. – P. 23–25. – URL : https://studlib.ru/doc/2618957/predvaritel._noe-inekcionnoe-zakreplenie-gruntov-pri.html, free (date of application 12/26/2023).
4. Makhmutov M.M. On the quality of soil compaction of the subgrade / M.M. Makhmutov, R.L. Sakhapov // News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2015. – № 2. – P. 1–5. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/o-kachestve-uplotneniya-gruntov-zemlyanogo-polotna/viewer> (date of application 12/26/2023).
5. Salakhov R.R. Strengthening soils used for highway construction with plastic waste / R.R. Salakhov // Transport. Transport Facilities. Ecology. – 2023. – № 1. – P. 20–23.
6. Fedulov A.A. The use of surfactants (stabilizers) to improve the properties of cohesive soils in road construction : abstract of thesis. dis. ... for the job application scientist step. Ph.D. technical Sciences (05.23.11) / Fedulov Andrey Aleksandrovich; Doctor of Technical Sciences, Professor. – M., 2005. – P. 20–21.
7. Tlekhusezh M.A. Application of available environmentally friendly cutting fluids for metal cutting / M.A. Tlekhusezh, L.N. Sorotskaya // Modern ecology: education, science, practice: materials of the international scientific and practical conference, Voronezh, October 04–06, 2017. – Voronezh : Scientific Book Publishing House, 2017. – Vol. 2. – P. 477–479.
8. Synthesis and antimicrobial activity of new carbamoyl-containing oxa(thia)zolidins and 3-dialkylaminobutanamides / M.A. Tlekhusezh, L.A. Badovskaya, G.A. Aleksandrova, Z.I. Tyukhteneva // Chemical-Pharmaceutical Journal. – 1999. – Vol. 33. – № 3. – P. 28–29.
9. Patent № 2797172 C1 Russian Federation, IPC A01N 37/18, A01N 37/22, A01P 21/00. Winter wheat seed germination activator containing a urea fragment: № 2022131748: application. 12/06/2022: publ. 05/31/2023 / M.A. Tlekhusezh; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kuban State Technological University».

10. Tlekhusezh M.A. Synthesis of hetaryl-1,3-oxazolidines with growth activity / M.A. Tlekhusezh, L.A. Badovskaya // Abstracts of the Cluster of Conferences on Organic Chemistry «OrgKhim-2016», St. Petersburg, June 27 – 01, 2016. – SPb. : VVM Publishing House LLC, 2016. – P. 463.
11. Gravis M.V. Chemical piles as a method of strengthening massifs of water-saturated clay soils / M.V. Gravis, E.N. Samarin, A.P. Penzev // Materials of the fifth All-Russian scientific and practical conference of young specialists «Engineering surveys in construction» Moscow, April 28, 2023. – M. : Tesera Publishing House, 2023. – P. 97–102.
12. Nurutdinov E.G. Application of geosynthetic materials in road construction / E.G. Nurutdinov // Materials of the XIV International Student Scientific Conference «Student Scientific Forum». – URL : href=«<https://scienceforum.ru/2022/article/2018030859>»><https://scienceforum.ru/2022/article/2018030859> (date of application 12/26/2023).
13. Buzulukov V.I. Development of effective materials for construction based on waste from the woodworking, pulp and paper and microbiological industries : abstract of thesis. dis. ... Ph.D. tech. Sci. – Penza, 2007. – 42 p.
14. Bulanov P.E. Modification of clay soils strengthened with Portland cement for road pavements with a complex hydrophobic plasticizing additive : abstract of thesis. dis. ... Ph.D. tech. sci. – Kazan, 2017. – 20 p.