

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.138

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-53-64

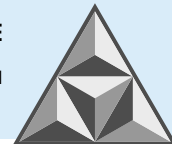
# Оценка влияния извести при укреплении песка мелкого на время его выдерживания при оптимальной влажности

**А.А. Игнатьев**<sup>1,2</sup>

**Алексей Александрович Игнатьев**

<sup>1</sup>Федеральное автономное учреждение «Российский дорожный научно-исследовательский институт»,  
Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Российская Федерация  
[ignatievaa@rosdornii.ru](mailto:ignatievaa@rosdornii.ru)



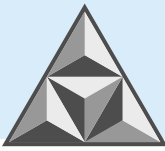
*В процессе эксплуатации автомобильных дорог не всегда удается добиться требуемых характеристик грунтов, которые обеспечивают необходимую долговечность и прочность. В этой связи широкую практику получила технология укрепления грунтов известью, позволяющая значительно улучшить их характеристики. Представлены результаты экспериментальных исследований, направленные на изучение особенностей влияния извести на характеристики песка и время выдерживания грунта при оптимальной влажности в герметичных пакетах. Показано, что введение 5% извести способствует увеличению оптимальной влажности песка на 1% и обеспечивает увеличение плотности скелета грунтоизвестковой смеси на 5% по сравнению с неукрепленным грунтом. Оптимальное время выдерживания песка мелкого, укрепленного известью, достигает 2 ч. Результаты открывают широкие возможности для дальнейших исследований по укреплению грунтов в ходе дорожного строительства.*

**Ключевые слова:** автомобильные дороги, песок мелкий, известь, оптимальная влажность, плотность скелета грунта

**Для цитирования:**

Игнатъев А.А. Оценка влияния извести при укреплении песка мелкого на время его выдерживания при оптимальной влажности // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 3. С. 53-64. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5358/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-53-64



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-53-64

# Evaluation of the impact for lime stabilization of fine sand on its curing time at optimum moisture content

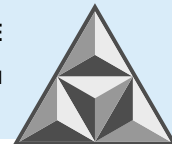
**A.A. Ignatyev<sup>1,2</sup>**

**Aleksey A. Ignatyev**

<sup>1</sup>Federal Autonomous Institution "Russian Road Research Institute", Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russian Federation

*ignatievaa@rosdormii.ru*



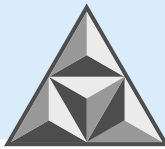
*It is not always possible to achieve the required characteristics of soils that would provide the necessary durability and strength during the operation of automobile roads. In this regard, the technology of soil reinforcement with lime, which allows to improve significantly the characteristics of the soil, is widely practiced. The paper presents the results of experimental studies. They are aimed at studying the peculiarities of lime impact on sand characteristics and time of soil holding at optimum humidity in sealed packages. The paper shows that the introduction of 5% lime helps to increase the optimum moisture content of sand by 1% and provides a 5% increase in the skeletal density of the soil-lime mixture compared to unstrengthened soil. The optimum curing time for fine sand strengthened with lime is 2 h. The results obtained open a wide range of possibilities for further research on soil strengthening for road construction.*

**Keywords:** automobile roads, fine sand, lime, optimum moisture content, soil skeleton density

**For citation:**

Ignatyev A.A. Evaluation of the impact for lime stabilization of fine sand on its curing time at optimum moisture content // *Smart Composite in Construction*. 2024. Vol. 5, Iss. 3. P. 53-64.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5358/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-53-64



## ВВЕДЕНИЕ

Технология стабилизации и укрепления грунтов автомобильных дорог и аэродромов с использованием извести зарекомендовала себя с положительной стороны и имеет достаточно широкую практику применения в Российской Федерации. Известь используют для высушивания грунтов и придания им новых характеристик, в основном, для получения требуемых эксплуатационных свойств временных дорог и на площадках строительных объектов. При этом достигаемые свойства грунтов становятся стабильными и позволяют снизить затраты на последующую эксплуатацию.

Большинство лабораторных и полевых испытаний с использованием извести подтверждает, что ее введение в грунты оправдано при соответствующем технико-экономическом обосновании и достигнутый результат значительно превосходит ожидания. В первую очередь, повышается возможность воспринимать значительные транспортные нагрузки и высокую интенсивность движения.

Известь представляет собой вяжущий материал в виде оксида кальция, с включением в небольшом количестве примесей оксидов магния, железа, кремния и гидроксида кальция (гидратная известь).

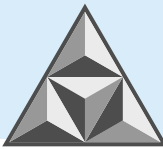
Популярность извести для строительной отрасли [1] невозможно переоценить. Она находит широкое применение в дорожном и аэродромном строительстве, ее широко применяют в качестве основного стабилизатора грунтовых оснований для покрытий.

Оптимальный состав грунто-известковой смеси подбирается в лаборатории в зависимости от требуемых параметров. По классификации, известь условно относится к I группе (неорганические/минеральные строительные материалы); ее целесообразно использовать для укрепления глинистых грунтов взамен цемента. Это связано с тем, что известь в процессе гидратации взаимодействует с частицами глины и заметно снижает ее пластичность. По этой причине ее следует использовать для глин с индексом пластичности  $> 10$  и влажности  $\leq 55\%$  по массе.

Традиционно в зарубежной практике количество извести для укрепления грунтов зависит от вида грунта. В соответствии с [2-8], для укрепления связных грунтов (суглинки и глины) рекомендовано добавлять от 5 до 10%, а для несвязных грунтов, в зависимости от влажности – от 2 до 8% извести. При этом стоит отметить, что методика подбора укрепленного состава грунта в разных странах отличается, как и ключевые измеряемые показатели.

В Российской Федерации отсутствуют четко закрепленные требования по применению извести [9]. Ранее в Советском Союзе действовала подробная «Инструкция по применению грунтов, укрепленных вяжущими материалами для устройства оснований и покрытий автомобильных дорог и аэродромов СН 25-74», в соответствии с которой для укрепления суглинков тяжелых рекомендовалось вводить 7-8% извести (для глин 8-10%), что согласуется с зарубежными нормами расхода.

В настоящее время, в соответствии с ГОСТ Р 70456 - 2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Грунты. Определение оптимальной влажности и максимальной плотности методом Проктора», одним из важнейших технологических критериев уплотняемости грунта является оптимальная влажность. Она определяется путем постепенного увеличения влаги от минимума к максимуму, когда грунт уже не уплотняется под действием ударной нагрузки. Следует отметить, что при таком способе определения влажности неизбежно защемление воздуха в виде воздушных пор и среднее значение может достигать от 4 до 6%, что в процессе



эксплуатации земляного полотна или нижних слоев дорожной одежды может приводить к разуплотнению грунтов. Целесообразно стремиться к содержанию пор  $\leq 1\%$ .

В соответствии с исследованиями [10-13], установлено, что в процессе добавления воды в грунты происходит перераспределение влаги и за счет возможности выдерживать грунт во времени можно добиться эффекта регулирования межфазного взаимодействия частиц, при котором повышается их уплотняемость и снижается трение. Эффект ограничен во времени и для различных видов грунтов проявляются неодинаково. Даже пески одной крупности могут значительно отличаться по параметрам оптимальной влажности. Именно поэтому для каждого конкретного вида грунта необходимо проводить дополнительные исследования по определению требуемого времени выдерживания при оптимальной влажности.

Когда речь идет об укреплении грунтов минеральными вяжущими, картина в части оценки оптимальной влажности изменяется кардинальным образом. Специалисты отрабатывают и вяжущие свойства вводимой добавки, и гранулометрический состав последней, и особенности ее взаимодействия с влагой.

Ниже представлены авторские результаты по установлению эффективной продолжительности выдерживания песчаного грунта, укрепленного известью с целью получения повышенных транспортно-эксплуатационных показателей.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В ходе исследований использовали методику ГОСТ 22733-2016 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности», в ходе которой осуществляли:

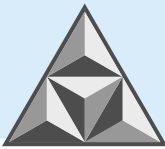
- определение гранулометрического состава грунта;
- определение значений оптимальной влажности исходного грунта;
- определение значений оптимальной влажности для грунта, укрепленного известью;
- выдерживание исходных образцов грунта при оптимальной влажности во времени и грунта, укрепленного известью;
- обработку и анализ полученных результатов.

*Нормативная документация:*

- ГОСТ 32727-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Песок природный и дробленый. Определение гранулометрического (зернового) состава и модуля крупности;
- ГОСТ 32725-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Песок природный и дробленый. Определение содержания пылевидных и глинистых частиц;
- ГОСТ 32728-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Песок природный и дробленый. Отбор проб;
- ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация.

*Приборы и материалы:*

- весы электронные с достигаемым пределом взвешивания не менее 6000 г и ценой деления не более 1 г;
- набор сит с ячейками размером 0.125; 0.25; 0.5; 1.0; 2.0; 4.0; 8.0 мм;
- поддоны и крышки для сит;
- сушильный шкаф, обеспечивающий циркуляцию воздуха и поддержание температуры в интервале  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ ;
- сито с размером ячейки 0.063 мм;
- противни металлические.



*Порядок проведения испытаний:*

определение гранулометрического состава грунта;

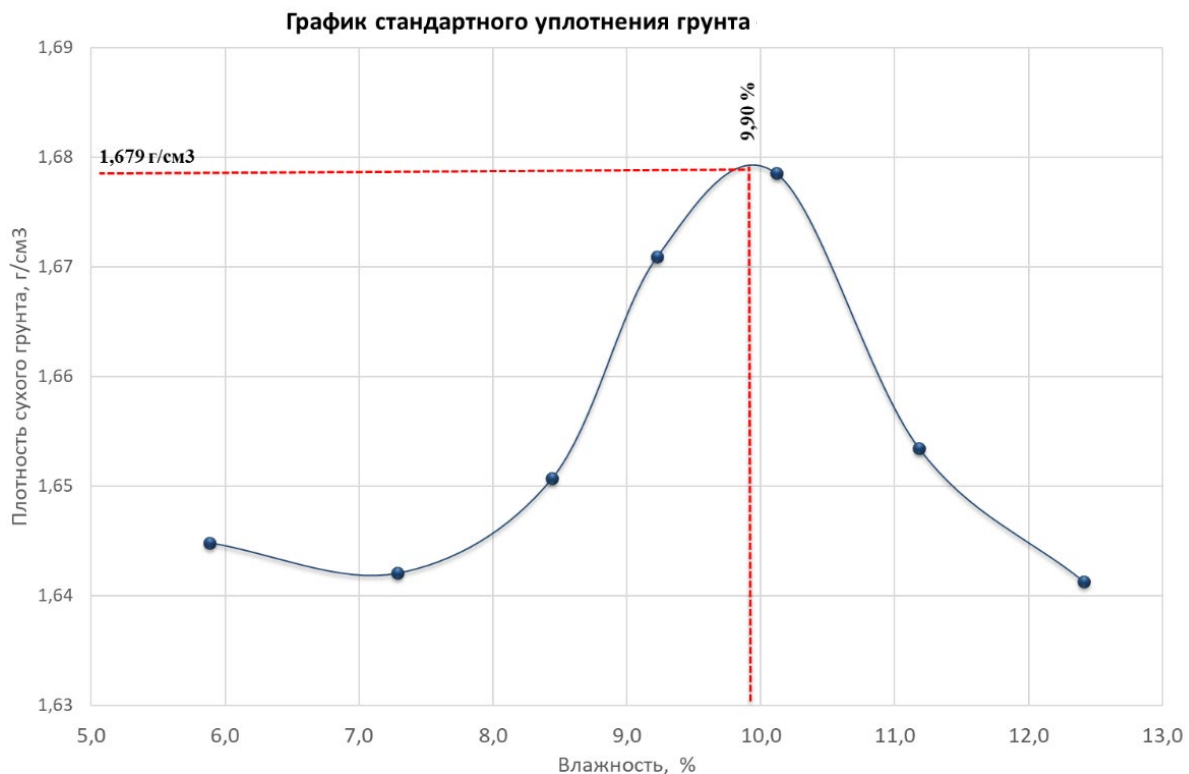
определение оптимальной влажности неукрепленного грунта.

Метод заключается в установлении зависимости плотности грунта от его влажности – от изначальной до оптимальной. При испытании используют не менее 5 образцов. По итогам осуществляют построение графиков зависимости плотности грунта от влажности, на основе которого определяют оптимальное значение последней.

В качестве оборудования применяют установку стандартного уплотнения СоюздорНИИ. Методика проведения испытаний аналогична методике Проктора; основное различие – в размерах формы, высоты падения груза и массы груза. В качестве грунта выбран Песок мелкий. Строительная Известь-пушонка по ГОСТ 9179-77.

*Определение оптимальной влажности мелкого песка*

В соответствии с утвержденной методикой оптимальная влажность песка мелкого составила 9.90%, а плотность –  $1.70 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ . Результаты определения оптимальной влажности песка мелкого приведены на рис. 1.



**Рис. 1.** График стандартного уплотнения для образца песка мелкого

**Fig. 1.** Diagram of standard compaction for a fine sand sample

Далее определяли оптимальную влажность для песка мелкого, укрепленного известью в соответствии с описанной методикой.

В итоге оптимальная влажность песка мелкого, укрепленного известью строительной в количестве 5% от массы песка, составила 10.8%. Плотность такого песка равняется  $1.70 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ . Результаты определения оптимальной влажности песка мелкого, укрепленного известью строительной в количестве 5% от массы песка, приведены на рис. 2.

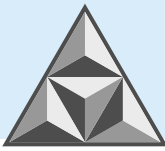


График стандартного уплотнения песка мелкого, укрепленного известью

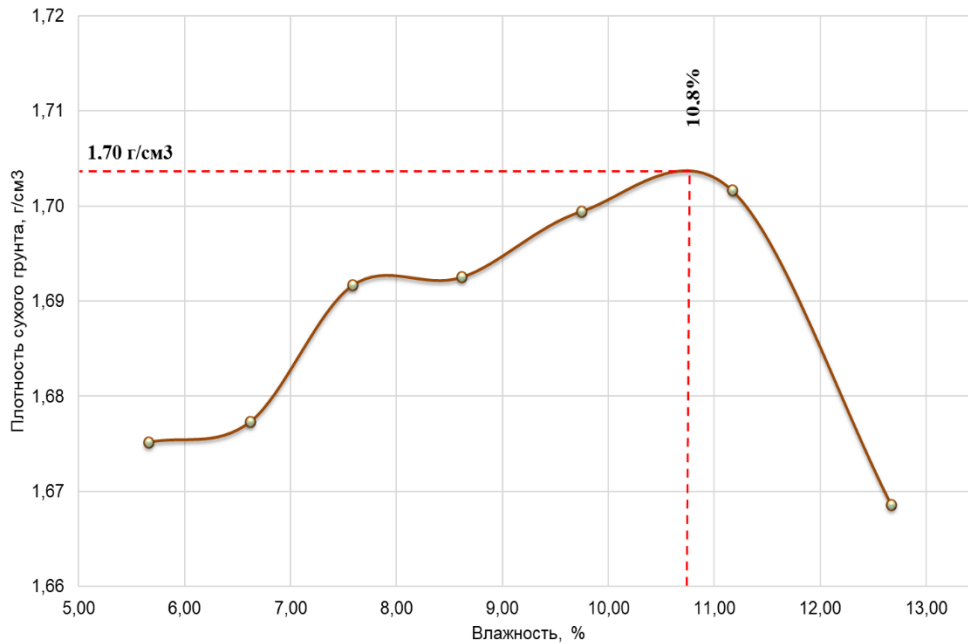


Рис. 2. Песок мелкий, укрепленный строительной известью в количестве 5% от массы песка  
 Fig. 2. Fine sand strengthened with building lime in the amount of 5% of the sand weight

В соответствии с описанной методикой на следующем этапе определяли плотность песка мелкого в процессе замачивания и выдерживания во времени в герметичном пакете с отбором и испытанием через 1 ч от начала испытаний, а затем – через каждые 2 ч. На рис. 3 представлены результаты исследований.

График замачивания 9,9%

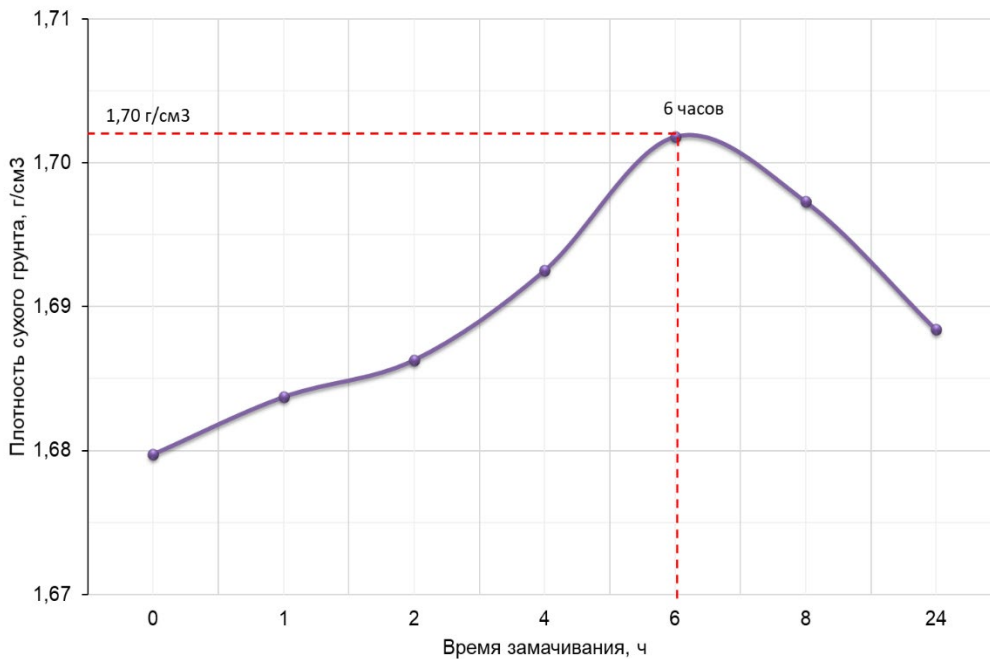
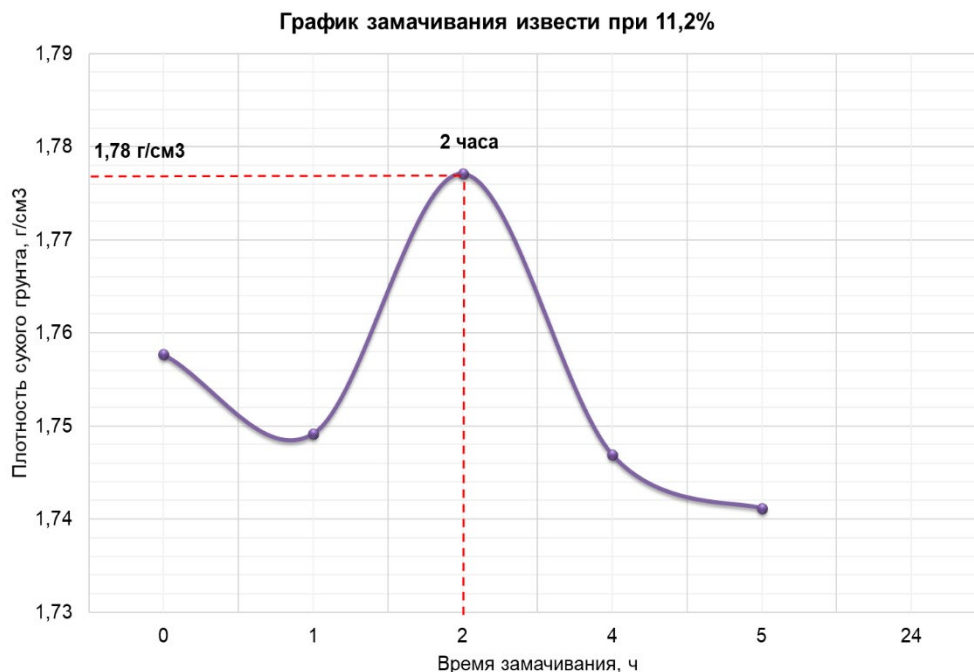
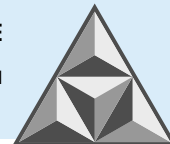


Рис. 3. График выдерживания песка мелкого в герметичном пакете при влажности 9.90%  
 Fig. 3. Diagram of keeping fine sand in a sealed bag at a humidity of 9.90%

Максимальная плотность для мелкого песка ( $1.70 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ ) установлена при времени выдерживания 6 ч.





**Рис. 4.** Выдерживание песка мелкого, укрепленного 5% извести, при оптимальной влажности

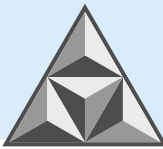
**Fig. 4.** Curing fine sand strengthened with 5% lime at optimum moisture content

Далее определяли оптимальное время выдерживания для песка мелкого, укрепленного 5% строительной извести (рис. 4).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе представленных графиков выявлены следующие закономерности. Введение в песок мелкий строительной извести в количестве 5% приводит к росту оптимальной влажности смеси почти на 1%. При этом важно понимать, что процент введенной извести незначителен. Если говорить о технологии выдерживания грунта при оптимальной влажности, для песка мелкого требуется почти 6 ч, чтобы добиться более существенных результатов при определении плотности скелета грунта. Разница между испытаниями по традиционной методике определения плотности и выдерживанием грунта в герметичном пакете при оптимальной влажности дает прирост плотности скелета грунта  $\approx 2\%$ . Объяснить столь значительное время на выдерживание можно тем, что в грунте происходит перераспределение влажности, которое для песка мелкого обеспечивает доувлажнение пылеватых фракций, способствующих развитию коллоидов. Очевидно, именно этот факт способствует эффективному уплотнению грунта.

Если проанализировать результаты испытаний песка мелкого, укрепленного строительной известью, они изменяются более динамично. Отмечается, что при добавлении извести в песок мелкий плотность увеличивается быстрее по сравнению с грунтом без добавки. Вероятно, это связано с дисперсностью извести, которая в процессе перемешивания заполняет поры в песке мелком, формируя оптимальную кривую гранулометрического состава полученной смеси, что дает впоследствии более прочную структуру. Данный факт интересен с точки зрения укрепления грунта и последующего производства работ по устройству земляного полотна или оснований дорожных одежд автомобильных дорог. Традиционно известь при введении в грунт выполняет две ключевые функции, а именно: осушение и компенсация избыточной влаги; увеличение плотности грунта.



Согласно представленным результатам, для полученной смеси песка мелкого и извести в процессе ее выдерживания при оптимальной влажности в герметичном пакете время выдержки не должно превышать 2 ч.

После этого происходит заметное снижение плотности полученной смеси. Так, по истечении 6 ч она падает более чем на 5%, что негативно сказывается на результатах уплотнения укрепленного грунта. При сравнении рис. 2 и 4 можно увидеть, что разница во времени между выдерживанием чистого песка мелкого и песка мелкого, укрепленного строительной известью в количестве 5%, составляет почти 4 ч.

Вероятно, это связано с тем, что известь по истечении 2 ч начинает активно проявлять вяжущие свойства. Важным результатом сравнения плотностей скелета песка мелкого, не укрепленного и укрепленного известью, является рост плотности почти на 5%, что дает возможность получить более плотную и прочную структуру. Эта особенность обеспечивает широкую популярность извести при использовании ее в качестве добавки, вводимой в различные виды грунтов.

## ВЫВОДЫ

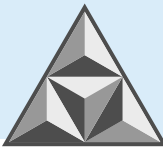
1. Исследования доказали, что введение различного количества воды в грунт оказывает существенное влияние на его уплотняемость. Лучшие результаты могут быть достигнуты в том случае, если грунт уплотнять не сразу после его увлажнения, а спустя некоторое время. Это время целесообразно определять отдельно для каждого вида грунта, что объясняется различным смазывающим эффектом, который образуется за счет набухания аутогенных пленок вокруг частиц.

2. В ходе исследований для песка мелкого установлено рациональное время его выдерживания при оптимальной влажности (6 ч). Для песка мелкого, укрепленного строительной известью, продолжительность выдерживания при оптимальной влажности составляет 2 ч, что связывается с проявлением вяжущих свойств извести.

3. Введение извести в количестве 5% от массы песка мелкого обеспечивает смещение кривой оптимальной влажности в сторону увеличения почти на 1%. Этот факт оказывает существенное влияние на уплотняемость получаемой грунтоизвестковой смеси. При наличии на объекте дорожного строительства переувлажненных грунтов возможна компенсация путем введения извести, что позволит более эффективно осуществлять работы по их уплотнению. Подобные исследования целесообразно продолжить также на образцах других видов грунтов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Подольский В.П.** О возможности расширения ресурсной базы дорожного строительства за счет стабилизации и укрепления грунтов / В.П. Подольский, Нгуен Ван Лонг, Нгуен Дык Ши // *Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура*. 2014. № 1 (33). С. 102-111.
2. Design Procedures for Soil Modification or Stabilization / Production Division. Office of Geotechnical Engineering. 120 South Shortridge Road Indianapolis, Indiana 46219. January 2008. 13 p.
3. Методы стабилизации грунтов различными материалами [Электронный ресурс]. URL: <https://theconstructor.org/geotechnical/soil-stabilization-methods-and-materials/9439> / (дата обращения: 09.07.2024).
4. Field Manual. No. 5-410 / Headquarters Department of the Army Washington, DC, 23 December 1992. Change 1, 4 June 1997. 344 p.
5. **Halsted G.E.** Guide to Cement-Modified Soil (CMS) / G.E. Halsted, W.S. Adaska, W.T. McConnell / EB242 Portland Cement Association. Skokie, Illinois, USA. 2008. 20 p.



6. Lime-treated soil construction manual lime stabilization & lime modification / Published by National Lime Association. The Versatile Chimikal. January 2004. Bul. 326. 41 p.
7. **Makusa G.P.** State of the Art Review Soil Stabilization Methods and Materials in Engineering Practice. Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering / Division of Mining and Geotechnical Engineering. Luleå University of Technology. Luleå, Sweden. 2012. 35 p.
8. ASTM (2000b) Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lb/ft). Designation D698 / Annual Book of ASTM Standards. ASTM American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, US.
9. **Слабодчикова Н.А., Плюта К.В.** Необходимость совершенствования нормативной базы по подбору составов грунтов, укрепленных неорганическим вяжущим. ИРГТУ.
10. Патент № 2098553 РФ. Способ стабилизации песчаного грунтового основания: 1997 / Придатко Ю.М., Шабров В.Л., Лебедев А.Б., Сальникова К.С., Доброхотов В.Б.
11. **Игнатьев А.А.** Повышение эффективности уплотнения несвязных грунтов за счет регулирования межфазного взаимодействия частиц / А.А. Игнатьев, Г.В. Пренглаев // *Дороги и мосты*. 2018. № 1 (39). С. 10. EDN POWGIJ.
12. **Игнатьев А.А., Готовцев В.М., Разговоров П.Б.** Градиентная модель адгезии жидкости на поверхности строительного материала // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4. № 4. С. 30-49. DOI: <https://doi.org/10.52957/2782-1919-2024-4-4-30-49> (дата обращения: 09.07.2024).
13. **Игнатьев А.А., Готовцев В.М.** Transformation of a disturbed sitting drop // *Умные композиты в строительстве*. 2020. Т. 1. № 1. С. 39-44. DOI: [https://doi.org/10.52957/27821919\\_2020\\_1\\_39](https://doi.org/10.52957/27821919_2020_1_39) (дата обращения: 09.07.2024).

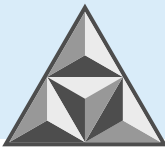
*Поступила в редакцию 10.07.2024*

*Одобрена после рецензирования 16.08.2024*

*Принята к опубликованию 13.09.2024*

## REFERENCES

1. **Podolsky, V.P., Nguyen, Van Long and Nguyen, Dyk Shi** (2014), "On the possibility of the expansion of a road construction resource by the soil stabilization and consolidation", *Nauchnyj vestnik Voronezhskogo GASU. Stroitel'stvo i arhitektura [Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture]*, no. 1 (33), pp. 102-111 (in Russian).
2. Design Procedures for Soil Modification or Stabilization / Production Division. (2008), Office of Geotechnical Engineering, 120 South Shortridge Road Indianapolis, Indiana 46219.
3. Methods of soil stabilisation with different materials. Available at: <https://theconstructor.org/geotechnical/soil-stabilization-methods-and-materials/9439/> (accessed 09.07.2024) (in Russian).
4. Field Manual. No. 5-410 / Headquarters Department of the Army Washington, DC, 23 December 1992. Change 1, 4 June 1997. 344 p.
5. **Halsted, G.E., Adaska, W.S. and McConnell, W.T.** (2008), Guide to Cement-Modified Soil (CMS) / G.E. Halsted, EB242 Portland Cement Association. Skokie, Illinois, USA.
6. Lime-treated soil construction manual lime stabilization & lime modification (2004), Published by National Lime Association. The Versatile Chimikal, Bul. 326, 41 p.
7. **Makusa, G.P.** (2012), "State of the Art Review Soil Stabilization", Methods and Materials in Engineering Practice. Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering / Division of Mining and Geotechnical Engineering. Luleå University of Technology. Luleå, Sweden. 35 p.
8. ASTM (2000b) Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lb/ft). Designation D698 / Annual Book of ASTM Standards. ASTM American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, US.



9. **Slabodchikova, N.A. and Pluta, K.V.** (2018), "Necessity of improvement of normative base on selection of soil compositions strengthened by inorganic binder", *Dorogi i mosty [Roads and Bridges]*, no. 1 (39), p. 26 (in Russian).
10. **Pridatko, Yu.M., Shabrov, V.L., Lebedev, A.B., Salnikova, K.S. and Dobrokhotov, V.B.** (1997). Method of stabilization of sandy soil foundation, Patent RF 2,098,553.
11. **Ignatyev, A.A. and Prenglaev, G.V.** (2018), "Increasing the efficiency of compaction of unbound soils by regulating the interfacial interaction of particles", *Dorogi i mosty [Roads and Bridges]*, no. 1 (39), P. 10 (in Russian).
12. **Ignatiev, A.A., Gotovtsev, V.M. and Razgovorov, P.B.** (2023), "Gradient model of liquid adhesion on the building material surface", *Umnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Construction]*, no. 4 (4), pp. 30-49. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023) (accessed 09.07.2024) (In Russian).
13. **Ignatyev, A.A. and Gotovtsev, V.M.** (2020), "Transformation of a disturbed sitting drop", *Umnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Construction]*, no. 1 (1), pp. 39-44. Available at: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5036/view> (accessed 09.07.2024).

Received 10.07.2024

Approved 16.08.2024

Accepted 13.09.2024