

УДК 911.37:691.5:625.81

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПОДБОРА СОСТАВА ГРУНТОВ,  
УКРЕПЛЕННЫХ ИЗВЕШЬЮ**

Н.А. Слободчикова

**SCIENTIFIC BASIS FOR THE SELECTION OF THE COMPOSITION  
OF SOILS, FORTIFIED WITH LIME**

N.A. Slobodchikova

**Аннотация.** Применение извести для укрепления грунтов автомобильных дорог позволяет значительно снизить стоимость строительства, реконструкции и капитального ремонта автомобильных дорог. Известь может применяться в дорожном строительстве для достижения таких целей, как осушение грунтов и укрепление грунтов. В статье рассматриваются физико-химические процессы структурообразования грунтов, укрепленных известью. Также в статье анализируются методики подбора составов грунтоизвестковых смесей, принятые в Бельгии, Швеции, США и Российской Федерации. В разных странах методики подбора составов грунтовых смесей отличаются. Основные расхождения в методиках подборов составов в основном касаются методик лабораторных испытаний и определения качественных характеристик, связанных с оптимизацией грунтовой смеси. Российские нормативные требования по подбору составов грунтовых смесей очень трудоемкие и требуют совершенствования в области укрепления грунтов известью с учетом опыта других стран.

**Ключевые слова:** *грунт, укрепленный известью; грунтоизвестковая смесь; укрепленный грунт; укрепленные грунты дорожных одежд.*

**Abstract.** The use of lime to strengthen the soil of highways can significantly reduce the cost of construction, reconstruction and major repairs of highways. Lime can be crushed in road construction to achieve such goals as drainage of soils and strengthening of soils. The article deals with the physicochemical processes of the formation of soils reinforced by the news. Also in the article methods of selection of compositions of soil-limy mixtures, adopted in Belgium, Sweden, the USA and the Russian Federation are analyzed. In different countries, the methods for selecting the compositions of ground mixtures are different. The main discrepancies in the methods of selection of compositions are mainly concerned with the methods of laboratory tests and determination of the qualitative characteristics associated with the optimization of the soil mixture. Russian regulatory requirements for the selection of mixtures of soil mixtures are very labor-intensive and require improvement in the field of strengthening soils with lime, taking into account the experience of other countries.

**Key words:** *primer reinforced with lime; ground-lime mix; strengthened soil; reinforced soil of road clothes.*

**Введение**

Строительство автомобильных дорог связано с большим потреблением высокопрочных каменных материалов, что приводит к значительной стоимости строительства, реконструкции и капитального ремонта автомобильных дорог, т.к. количество месторождений горных пород, пригодных для производства этих материалов, на территории нашей страны ограничено. Использование в конструкциях автомобильных дорог укрепленных грунтов взамен высокопрочных каменных материалов позволяет значительно снизить стоимость строительства, реконструкции и капитального ремонта автомобильных дорог. Одним из наиболее известных способов укрепления грунтов в дорожном строительстве является укрепление известью [1-4].

## **Опыт применения извести в дорожном строительстве**

Известь применяют как в гашеном, так и в негашеном виде. Известь может применяться в дорожном строительстве для достижения таких целей, как:

1. Осушение грунтов;
2. Укрепление грунтов.

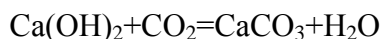
Негашеная известь при смешивании с влажным грунтом, забирает до 32% от его собственного веса воды из окружающего грунта с образованием гашеной извести. Выделяемое тепло, при этой реакции будет дополнительно приводить к снижению влажности из-за испарения. Причем реакция с водой происходит даже в том случае, если грунт не содержит значительного количества глинистых частиц. Реакция же с глинистыми частицами вызывает дальнейшее осушение. В результате осушение происходит в течение нескольких часов, что позволяет уплотнить грунт значительно быстрее, чем при естественном испарении.

В Российской Федерации укрепление грунтов известью регламентируется ГОСТ 23558-94 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия (с Изменениями N 1, 2)» [5]. Данный документ устанавливает возможность применения извести как самостоятельное вяжущее и в составе комплексных вяжущих в качестве активатора твердения. В тоже время в этом документе отсутствуют сведения о качественных характеристиках грунтов, укрепленных известью, отсутствуют четкие рекомендации по подбору составов грунтоизвестковых смесей. Между тем в Российской Федерации и других странах накоплен большой опыт по известкованию грунтов [1-4, 6-10].

## **Физико-химические процессы при укреплении грунтов известью [3, 6-9]**

### **Песчаные грунты**

Процесс затвердения извести начинается с испарения воды и кристаллизации гидроксида кальция. С течением времени тонкодисперсные частицы гидрата окиси кальция в присутствии воды начинают перекристаллизовываться в более крупные кристаллы. В результате сращивания кристаллов  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  образуется пространственно разветвленный каркас, окружающий и цементирующий песчаные частицы. Также при твердении происходит поглощение углекислоты из воздуха и преобразование в углекислый кальций (происходит процесс карбонизации).



Процесс карбонизации протекает медленно в присутствии влаги при достаточно крупных газопроницаемых порах и распространяется на небольшую глубину в твердеющем материале.

Пленка углекислого кальция, образующаяся в первый период твердения на поверхности извести, кольматирует поры и тем самым затрудняет дальнейшее проникновение углекислоты в более глубокие внутренние слои грунта. Благодаря этому процесс карбонизации сильно тормозится и может даже почти приостановиться.

Цементирующие массу песка в монолит кристаллы  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и  $\text{CaCO}_3$  придают ему относительно небольшую прочность. Такой материал недостаточно устойчив к воздействию воды и отрицательных температур.

### **Глинистые грунты**

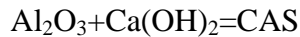
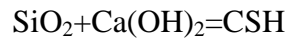
Известь является воздушным вяжущим. При укреплении глинистых грунтов она вступает в химическое и физико-химическое взаимодействие с тонкодисперсными частицами грунта и приобретает свойства гидравлического вяжущего. Можно выделить две стадии.

1. Модификация. После первоначального смешения ионы  $\text{Ca}^{+}$  из гашеной извести мигрируют к поверхности глинистых частиц и вытесняют воду и другие ионы (натрия и

водорода). Наличие в супесях и глинах тонкодисперсных частиц алюмосиликатного состава, а также активного кварца в условиях щелочной среды, вызванной гидратом окиси кальция, приводит к образованию гидросиликатов тоберморитового типа различной основности  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ . Увеличение прочности происходит за счет обмена катионов, при котором катионы натрия и водорода замещены ионами кальция. Даже в грунтах где глина насыщена ионами кальция (карбонатные грунты), добавление извести увеличит  $\Phi$ и следовательно увеличит интенсивность обмена.

Грунт становится рыхлый и зернистый. Уменьшается число пластичности и наблюдается тенденция к набуханию и сжимаемости, развивается процессы флокуляции (образования хлопьев) и агломерации (образование более крупных по размерам «вторичных» частиц или агрегатов). Образование хлопьев и агрегатов происходит в течение нескольких часов.

2. Стабилизация. При добавлении в грунт извести и воды кремнезем и глинозем ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), образующие глинистый грунт, освобождаются и вступают в реакцию с гидроксидом кальция. При этом pH грунта быстро возрастает (более 10,5), что способствует протеканию реакции. Происходит разрушение глинистых частиц с образованием малоосновных гидросиликатов и гидроалюминатов.



Гидросиликаты (CSH) и гидроалюминаты (CAH) представляют собой новые цементирующие вещества, образующиеся в портландцементе. Они образуют скелет, который увеличивает прочность стабилизированного грунта. Из гранулированного хлопьевидного грунт превращается в жесткий относительно непроницаемый слой со значительной несущей способностью. Процесс стабилизации начинается в течение нескольких часов и продолжается в течение многих лет, благодаря чему происходит нарастание прочности. Образованная структура является постоянной, прочной и непроницаемой при этом одновременно прочной и гибкой.

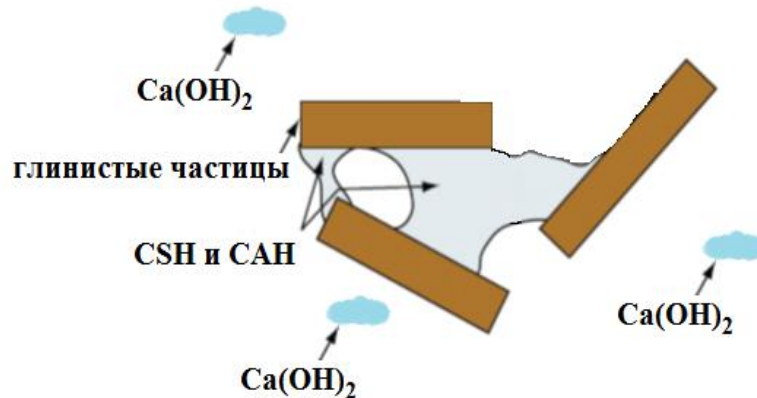


Рисунок 1 – Стабилизация глинистого грунта известью

Введение в глинистый грунт извести повышает его водоустойчивость и повышает его механическую прочность.

### Подбор составов грунтоизвестковой смеси

Для определения оптимального количества извести для укрепления грунтов в лабораторных условиях производится подбор состава грунто-известкового соотношения.

В основе всех методик подбора состава грунтоизвестковой смеси лежит ориентировочное значение количества извести табл. 1, которое корректируется путем определения качественных характеристик грунтоизвестковой смеси.

Таблица 1 – Ориентировочное содержание извести при подборе состава грунтоизвестковой смеси

Наименование конструктивного элемента автомобильной дороги	Содержание извести в грунтоизвестковой смеси, % от массы грунта		
	США [8, 10]	Швеция [6]	США [7]
Слои автомобильных дорог из несвязных грунтов	2-8	-	4 ± 0,5 5 ± 1
Слои автомобильных дорог из связных грунтов	5-8	6-8 для суглинков 8-10 для глин	
Земляное полотно	3-6	-	
Основание дорожной одежды	2-4	-	

В разных странах методики подбора составов грунтовых смесей отличаются. Основные расхождения в методиках подборов составов в основном касаются методик лабораторных испытаний и определения качественных характеристик, связанных с оптимизацией грунтовой смеси. Наиболее широкий опыт применения грунтов, укрепленных известью, имеют такие страны как Франция, Бельгия и США.

#### Французская и бельгийская методики

Минимальное количество извести определяется исходя из того количества при котором число пластичности грунтоизвестковой смеси существенно не изменится. Качество грунтоизвестковой смеси для устройства слоев оснований определяется параметрами:

- Immediate Bearing Index (IBI), который представляет собой набор прочности образцов грунта, укрепленного известью, в 90-минутном возрасте, %.

Качество грунтоизвестковой смеси для устройства слоев покрытий кроме параметра IBI также определяется параметрами:

- $CBR_{SP}$  – набор прочности CBR, образцов, уплотненных в соответствии с методом Проктора [11, 12], и подвергнутых насыщению воде в течение 4 сут.;
- Отношение

$$\frac{CBR_{SP}}{IBI} \geq 1,0;$$

- Набухание  $G_v$ , которое определяется после 168 часов выдерживания в воде при 40 °С;
- Морозостойкость UCS, которая определяется как прочность на сжатие после требуемого количества циклов замораживания-оттаивания, МПа.
- Водостойкость I, которая определяется как

$$I = \frac{UCS_{(28+32i)}}{UCS_{(60)}} \geq 0,8,$$

где:  $UCS_{(28+32i)}$  - прочность на сжатие цилиндрических образцов, которые после нормального твердения в возрасте 28 сут. были подвергнуты насыщению водой в течение 32 сут. (при  $20 \pm 2$  °С);  $UCS_{(60)}$  - прочность на сжатие цилиндрических образцов нормального твердения в возрасте 60 сут.

#### Методика, принятая в США

Методика подбора состава грунтоизвестковой смеси включает в себя определение минимального количества извести с помощью теста Eades и Grim [9, 11-12]. Суть этого метода заключается в подборе минимального количества извести, при котором pH грунтоизвестковой смеси будет соответствовать значению 12.40.

В отличие от французской и бельгийской методик данный метод позволит определить необходимое количество извести с изготовлением минимального количества образцов, что существенно упрощает процедуру подбора состава.

Качество грунтоизвестковой смеси оценивается показателями:

- Прочность на сжатие образцов после 7 дней твердения на воздухе при температуре 40 °С и 24-часового капиллярного замачивания;
- Набухание  $G_v$ .

### **Методика, принятая в Российской Федерации**

Согласно ГОСТ 23558-94 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия (с Изменениями N 1, 2)» качество грунтоизвестковой смеси должно оцениваться по показателям:

- Прочность на сжатие и растяжение при изгибе образцов укрепленного грунта в возрасте 28, 90 и 180 сут. в зависимости от вида вяжущего;
- Морозостойкость - число циклов попеременного замораживания и оттаивания, при которых допускается снижение прочности на сжатие не более чем на 25% от нормируемой прочности в проектном возрасте.

### **Заключение**

Учитывая изложенное выше, можно сделать выводы:

1. Зарубежные методики оценки качества подобранной грунтоизвестковой смеси позволяют оценить качество этой смеси в более короткие сроки.
2. Методика, принятая в США, позволяет определить минимальное количество извести на основе определения pH и является более предпочтительной т.к. уменьшает трудоемкость работ при подборе состава грунтоизвестковой смеси.
3. Российские нормативные документы не содержат подробных рекомендаций по подбору составов грунтоизвестковой смеси, лабораторные испытания этих составов очень трудоемкие.

Следовательно, российские нормативные документы требуют совершенствования в области укрепления грунтов известью с учетом опыта других стран.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Волкова Е.В., Иванов Е.И., Нечаев Д.Н. Учет нестабилизированного состояния грунтов при оценке пространственной устойчивости откосов насыпей автомобильных дорог // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2015. № 2 (13). С. 51-57.
2. Слободчикова Н.А., Плюта К.В., Дзогий А.А. Перспективы использования отходов производства и потребления при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте автомобильных дорог // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 8. С. 126-132.
3. Безрук В.М., Гурячков И.Л., Луканина Т.М., Агапова Р.А. Укрепленные грунты. (Свойства и применение в дорожном и аэродромном строительстве). М.: Транспорт, 1982. 231 с.
4. Рудых А.В., Пуценко К.Н. Обзор нормативной документации в области проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений на автомобильных дорогах // Молодежный вестник ИрГТУ. 2015. № 2. С. 6.
5. ГОСТ 23558-94 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия (с Изменениями N 1, 2)»
6. Gregory Paul Makusa. 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 Luleå. 2012. P. 35.





7. Design Procedures for Soil Modification or Stabilization. Production Division Office of Geotechnical Engineering 120 South Shortridge Road Indianapolis, Indiana 46219. January 2008. P. 13.
8. Lime-treated soil construction manual lime stabilization & lime modification. Published by Nacional Lime Association Lime The Versatile Chimikal. January 2004. Bulletin 326, p. 41.
9. NLA Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil. Technical Brief.NLA National Lime Association. Arlington, VA. 2006.
10. Методы стабилизации грунтов различными материалами [Электронный ресурс]. URL: <https://theconstructor.org/geotechnical/soil-stabilization-methods-and-materials/9439/> (дата обращения: 14.12.2017)
11. ASTM 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, WestConshohocken, PA, US. 2000.
12. ASTM Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization. Designation ASTM D6276. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, US. 2006.

## REFERENCES

1. Volkova E.V., Ivanov E.I., Nechaev D.N. *Uchet nestabilizirovannogo sostoyaniya gruntov pri ocenke prostranstvennoj ustojchivosti otkosov nasypej avtomobil'nyh dorog* [Accounting unstabilized soil conditions in the evaluation of spatial stability of slopes of embankments of roads]. *Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2015. No 2 (13), pp. 51-57.
2. Slobodchikova N.A., Plyuta K.V., Dzogij A.A. *Perspektivy ispol'zovaniya othodov proizvodstva i potrebleniya pri stroitel'stve, rekonstrukcii i kapital'nom remonte avtomobil'nyh dorog* [Prospects for the use of production and consumption wastes during the construction, reconstruction and major repairs of highways]. *Vestnik Irkutskogo gosudar-stvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016. No 8, pp. 126-132.
3. Bezruk V.M., Guryachkov I.L., Lukanina T.M., Agapova R.A. *Ukreplennye grunty. (Svoystva iprimenenie v dorozhnom I aehrodromnom stroitel'stve)* [Fortified soils. (Properties and applications in road and airfield construction)]. M.: Transport. 1982. 231 p.
4. Rudyh A.V., Pucenko K.N. *Obzor normativnoj dokumentacii v oblasti proektirovaniya, stroitel'stva i ehkspluatacii inzhenernyh sooruzhenij na avtomobil'nyh dorogah* [Review of regulatory documentation in the design, construction and operation of engineering structures on highways]. *Molodezhnyj vestnik IrGTU*. 2015. No 2, p. 6.
5. *GOST 23558-94 «Smesi shchebenochno-gravijno-peschanye i grunty, obrabo-tannye neorganicheskimi vyazhushchimi materialami, dlya dorozhnogo i aehro-dromnogo stroitel'stva. Tekhnicheskie usloviya (s Izmeneniyami N 1, 2)»* [GOST 23558-94 «Mixtures of crushed stone-gravel-sand and soils treated with inorganic binding materials for road and airfield construction. Technical conditions (with Changes N 1, 2)»]
6. Gregory Paul Makusa. 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 Luleå. 2012, p. 35.
7. Design Procedures for Soil Modification or Stabilization. Production Division Office of Geotechnical Engineering 120 South Shortridge Road Indianapolis, Indiana 46219. January 2008, p. 13.



8. Lime-treated soil construction manual lime stabilization & lime modification. Published by Nacional Lime Association Lime The Versatile Chimikal. January 2004. Bulletin 326. P. 41.
9. NLA (2006) Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil. Technical Brief. NLA National Lime Association. Arlington, VA
10. *Metody stabilizacii gruntov razlichnymi materialami [Elektronnyj resurs]* [Methods of soil stabilization by various materials [Electronic resource]]. URL: <https://theconstructor.org/geotechnical/soil-stabilization-methods-and-materials/9439/> (14.12.2017)
11. 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
12. ASTM (2006) Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization. Designation ASTM D6276. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, US.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

*Слободчикова Н.А.*

Иркутский Национальный Исследовательский Технический Университет, г. Иркутск, Россия, к.т.н., доцент кафедры автомобильных дорог.

E-mail: [NSlobodchikova@rambler.ru](mailto:NSlobodchikova@rambler.ru)

*Slobodchikova N.A.*

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation, Ph.D., Associate Professor of the Department of roads.

E-mail: [NSlobodchikova@rambler.ru](mailto:NSlobodchikova@rambler.ru)

Корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с автором статьи:  
664074 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, кафедра автомобильных дорог, Слободчикова Н.А.  
8(3952) 67-14-17