ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 169–184.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 169–184.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 625.7.8, 624.132, 624.138
DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-169-184 EDN: HHGLGA

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСРЕДОТОЧЕННОГО ВНЕСЕНИЯ ОСУШАЮЩИХ АГЕНТОВ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА

Евгений Николаевич Алькаев, Александр Александрович Лунёв
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* В современной практике строительства все больше внимания уделяется качеству сооружения земляного полотна автомобильных дорог. При этом в большинстве регионов Российской Федерации существует дефицит природных строительных материалов требуемого качества. В связи с этим актуальность приобретают методы стабилизации природных глинистых грунтов для доведения их свойств до требований нормативной документации.

Цель работы заключается в исследовании влияния сосредоточенного внесения осушающих агентов на механическую прочность глинистого грунта.

Задачами исследования являются: изучение влияния введения химических добавок на механические показатели глинистого грунта, а также влияния перерыва между смешением и уплотнением смеси.

Материалы и методы. Предлагаемый метод сосредоточенного внесения осушающих агентов (извести, активной золы-уноса и их комбинаций, в т. ч. с добавками), помимо осушающей функции, может потенциально улучшать механические свойства глинистых грунтов, т. е. выполнять функцию укрепления грунта. Для проверки этой гипотезы были проведены исследования по определению предела прочности на сжатие образцов глинистого грунта (суглинка легкого пылеватого), обработанного гидратированной известью в количестве 2, 4 и 6 % по массе, гидратированной высококальциевой золой-уносом

© Алькаев Е.Н., Лунёв А.А., 2023

в количестве 4, 8 и 12 % по массе, а также комбинацией гашеной извести и химических добавок-ускорителей ($CaCl_2$, $FeSO_4$, NaOH в количестве 0,5 и 1,0 % от массы сухого грунта). Для учета влияния перерыва между перемешиванием смеси и уплотнением также были проведены соответствующие экспериментальные исследования.

Результаты и выводы. Установлено, что повышение прочности глинистого грунта после внесения извести отмечается даже при малых дозировках, причем она существенно превосходит (на 194 %) эффект от внесения золы-уноса. Добавки $CaCl_2$ и NaOH существенно ускоряют набор прочности образцов, а внесение $FeSO_4$ улучшает кинетику набора прочности на первом этапе (до 7 суток) и в дальнейшем вызывает полное разрушение структуры материала. Исследование по изучению влияния перерывов до уплотнения также показало существенное снижение прочности при разрыве во времени между внесением агентов и уплотнением.

Ключевые слова: строительство, автомобильные дороги, стабилизация грунтов, глинистые грунты, известь, зола-унос, добавки-ускорители

Для цитирования: Алькаев Е.Н., Лунёв А.А. Исследование влияния сосредоточенного внесения осушающих агентов на механическую прочность глинистого грунта // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 169–184. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-169-184. EDN: HHGLGA

ORIGINAL ARTICLE

CONCENTRATED EFFECT OF DRYING AGENTS ON MECHANICAL PERFORMANCE OF CLAY SOIL

Evgeny N. Alkaev, Aleksandr A. Lunev
Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

Abstract. In modern construction, more and more attention is paid to the roadbed quality. At the same time, in most regions of the Russian Federation there is a shortage of natural building materials of the required quality. In this regard, methods of stabilizing natural clay soils should be developed to satisfy the regulatory documentation.

Purpose: The chemical additive effect on mechanical properties of clay soil.

Methodology: The proposed method of concentrated effect of drying agents (lime, active fly ash) can potentially improve the mechanical performance of clay soils, i.e., strengthen the soil. Compressive strength testing of clay soil (light powdery loam) includes its treatment in hydrated lime in the amount of 2, 4 and 6 wt.%, hydrated high-calcium fly ash in the amount of 4, 8 and 12 wt.%, and a combination of slaked lime and chemical additives-accelerators ($CaCl_2$, $FeSO_4$, NaOH) in the amount of 0.5 and 1.0 % of the dry soil mass.

Research findings: Even small amounts of lime improve the clay soil strength, which exceeds the effect from the fly ash introduction by 194 %. $CaCl_2$ and NaOH additives significantly accelerate the strength gain. The introduction of FeSO4 improves the strength gain kinetics at the first stage (up to 7 days) and further causes a complete destruction of the material structure. The compaction also shows a significant decrease in the tensile strength during the time between the dry agent introduction and compaction.

Keywords: construction, highway, soil stabilization, clay soil, lime, fly ash, accelerators

For citation: Alkaev E.N., Lunev A.A. Concentrated effect of drying agents on mechanical performance of clay soil. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 169–184. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-169-184. EDN: HHGLGA

Введение

В настоящее время в Российской Федерации значительно увеличились объёмы дорожного строительства в связи с действием национального проекта «Безопасные качественные дороги». Увеличение объемов работ вызывает дефицит инертных материалов и способствует вовлечению в строительный процесс местных грунтов. При этом влажность этих грунтов не всегда соответствует показателям, регламентируемым строительными нормами.

Глинистые грунты, влажность которых превышает требуемую, не поддаются необходимому уплотнению механическими средствами, имеют повышенную липкость, низкие деформационные и прочностные характеристики, подвержены морозному пучению. Следовательно, возведение земляного полотна из таких грунтов возможно только после их технической мелиорации (стабилизации).

Профессором В.В. Сиротюком выделяются три группы методов улучшения строительных свойств грунтов с повышенной влажностью: механические, физические и химические[1].

Наиболее распространен на практике метод консолидации грунтов, т. е. постепенное уплотнение за счет нагрузки от вышележащих слоев грунта насыпи [1]. При этом консолидация земляного полотна из грунтов с повышенной влажностью, рассчитанного на естественную консолидацию, может продолжаться от 1 до 3 лет (в песчаных грунтах) и от 4 до 8 лет (в глинистых грунтах). Ускорение консолидации возможно при устройстве вертикальных и горизонтальных слоёв из дренирующих материалов [2, 3, 4].

При механических методах технической мелиорации грунтов с повышенной влажностью возникают проблемы с налипанием грунта на рабочие органы техники и затрудняется проходимость техники вследствие низкой несущей способности грунта. Таким образом, уменьшается производительность техники и экономическая эффективность [5].

При воздействии температурным полем в общем случае просыхание грунтов происходит путем физического испарения воды с поверхности. При этом процесс сушки грунта зависим от погодно-климатических факторов, таких как температура, скорость и повторяемость ветра, количество осадков, что является недостатком данного метода [5].

Одним из нетрадиционных, но перспективных способов технической мелиорации грунтов является применение эффекта электроосмоса [6, 7, 8], основанного на воздействии на грунт электромагнитного поля. Этот способ заключается в пропускании через влажный грунт постоянного электрического тока, который подается в массив путем погружения в него металлических электродов. При этом полярные молекулы воды устремляются к отрицательно заряженному перфорированному электроду-катоду, из которого вода удаляется. Однако использование этого метода требует специалистов высокой квалификации, сложного оборудования и высокой культуры производства работ.

[1] Сиротюк В.В. Сооружение земляного полотна из грунтов с влажностью выше оптимальной. Омск: СибАДИ, 2018. 174 с.

Введение активных химических добавок в грунт с влажностью выше допустимой предполагает их физико-химическое взаимодействие. При этом, как правило, грунт не только осушается, но и укрепляется, т. е. приобретает более высокие и устойчивые механические свойства [9]. Возможно комплексное воздействие, например, введение химических реагентов с помощью электромагнитного поля [10, 11, 12].

В качестве стабилизаторов глинистых грунтов широко используют портландцемент и известь. Особое распространение данные добавки получили в европейских странах, поскольку дефицит строительных материалов вынуждает применять стабилизаторы для улучшения физико-механических свойств глинистых грунтов [13, 14, 15]. Помимо цемента и извести, рекомендуются другие добавки, такие как зола-унос, доменный шлак, зола инсенерации ТБО, фосфогипс, красный шлам (отход производства глинозема методом Байера), карбонат кальция, хлорид кальция, лигносульфонат и другие, которые также повышают физико-механические показатели грунтов [15, 16, 17, 18].

Введение химических добавок в глинистый грунт с повышенной влажностью подразумевает только улучшение физико-механических показателей. Предлагаемый авторами настоящей статьи метод сосредоточенного воздействия осушающего агента главным образом направлен на осушение грунта в карьере. Сосредоточенное воздействие – это устройство прорезей определенных размеров и заполнение их осушающим агентом. В отличие от методов, подразумевающих применение других активных добавок, грунт осушается в карьере, и на этапе разработки влажность грунта находится в допустимых пределах. С этой точки зрения наиболее подходящими добавками являются негашёная известь и высококальциевые золы-уносы, которые наряду с уменьшением влажности грунта улучшают его физико-механические свойства [19, 20, 21, 22, 23].

Эффект осушения достигается за счет того, что происходит гашение извести водой, содержащейся в массиве грунта. В результате гашения происходит образование гидроксида кальция, который является медленнотвердеющим вяжущим материалом, способствующим в результате протекания таких реакций, как катионный обмен, флокуляция/агломерация, карбонизация и пуццолановая реакция. Поэтому частичное смешивание глинистого грунта повышенной влажности с известью в процессе разработки будет способствовать снижению пластичности, увеличению оптимальной влажности, уменьшению максимальной плотности [24] и пучения, увеличению сопротивляемости циклам высушивания/увлажнения [25] и несущей способности [26, 27, 28, 29, 30].

Поскольку известь является медленнотвердеющим вяжущим, а технологические перерывы в производстве работ увеличивают сроки строительства и сдачи завершенного объекта в эксплуатацию, в данной работе исследовались различные добавки для ускорения твердения [16, 17]. В качестве ускорителей рассматривали такие добавки, как сернокислое железо, каустическая сода, хлорид кальция.

Цель работы – исследование влияния сосредоточенного внесения осушающих агентов на механическую прочность глинистого грунта. Задачами исследования являются изучение влияния введения химических добавок на

механические показатели глинистого грунта, а также влияния перерыва между смешением и уплотнением смеси.

Материалы и методы

Глинистый грунт. В качестве исследуемого грунта был использован суглинок легкий пылеватый из карьера на базе ООО «Сибирский Железобетон» в г. Омске. Свойства грунта приведены в табл. 1. После отбора проб грунт высушивался до постоянной массы при температуре (105 ± 5) °С и измельчался на грунтовой мельнице МГ-1Ф до размеров гранул менее 1 мм.

Таблица 1

Физико-механические свойства грунта

Table 1

Physical and mechanical properties of soil

Наименование показателя	Фактические данные	Ед. изм.
1. Влажность на границе текучести	31,38	%
2. Влажность на границе раскатывания	19,46	%
3. Число пластичности	0,12	–
4. Оптимальная влажность	17,8	%
5. Максимальная плотность скелета грунта	1,77	г/см³
6. Плотность частиц грунта	2,60	г/см³
7. Содержание песчаных частиц (2–0,05 мм)	4,1	%
8. Ph водной вытяжки	9,15	–
9. Емкость катионного обмена	7,8	$мг_{экв}$/100 г
10. Потери при прокаливании	3,54	%

Известь. Использовалась гидратная известь (пушонка) производства ООО «ОМИКС». Перед проведением исследований известь высушивалась в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре (105 ± 5) °С и измельчалась до размеров менее 0,5 мм. На момент испытания содержание CaO+MgO составляло 3–4 % от общей массы извести.

Зола-унос. Используемая в исследовании зола-унос была отобрана с электрофильтров Новосибирской ТЭЦ-3. Отбор проб велся в герметичную тару для сохранения естественной влажности. Химический состав приведен в табл. 2. По химическому составу зола является высококальциевой, низкосульфатной (относится к классу С по ASTM C618).

Добавки. Все добавки ($CaCl_2$, $FeSO_4$, NaOH) поставлялись ООО «Омскреактив» в порошкообразном виде. Добавки при необходимости измельчались до размеров менее 0,1 мм, для анализа использовался семиводный сульфат железа (чистый), остальные добавки (хлорид кальция (чистый для анализа) и гидроксид натрия (чистый для анализа)) безводные, поэтому для сульфата железа вводилась поправка на 7 молекул воды, чтобы концентрация чистого $FeSO_4$ соответствовала 0,5 % от массы сухого грунта.

Таблица 2

Химический состав золы-уноса

Table 2

Chemical composition of fly ash

ТЭЦ, источник топлива	Содержание окислов, % (в перерасчете на сухое вещество)									
	SiO_2	R_2O_3	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	$Na_2O + K_2O$	SO_3	$CaO_{св}$	п.п.п
Новосибирская ТЭЦ-3, Назаровский разрез	23,2–41,7	16,7–32,90	6,4–13,0	10,3–19,9	24,2–44,6	4,5–5,2	0,4–2,2	0,8–4,5	2,3–13,2	0,2–3,5

Вода. Для испытаний использовалась водопроводная питьевая вода. Водородный показатель (pH) – 7,7, содержание растворимых солей – 65 мг/дм^3, в том числе ионы SO_4 – 28,4 мг/дм^3, хлориды – 15 мг/дм^3.

План эксперимента

Изучение влияния извести. Для суглинка легкого пылеватого без добавления и с добавлением 2, 4 и 6 % извести при помощи прибора стандартного уплотнения были определены значения оптимальной влажности и максимальной плотности сухого грунта. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения максимальной плотности и оптимальной влажности

Table 3

Maximum density and best moisture of lime

Наименования показателя	Суглинок легкий пылеватый с добавлением извести в количестве			
	0	2 %	4 %	6 %
Оптимальная влажность, %	17,8	21,5	22,0	21,9
Максимальная плотность сухого грунта, г/см^3	1,77	1,63	1,57	1,58

Для изготовления образцов грунт перемешивался с гашеной известью в количестве 2, 4 и 6 % по массе сухого грунта. Перемешивание велось вручную до однородного распределения вяжущего по объему грунта. После этого смесь перемешивалась с водой (в количестве, необходимом для достижения оптимальной влажности) и хранилась в герметичном контейнере для равномерного распределения влаги по объему смеси в течение 30 мин.

Образцы формовали путем трамбования навески в малом приборе стандартного уплотнения (ПСУ), форма предварительно смазывалась техническим вазелином, грунт засыпался в один слой и уплотнялся 20 ударами груза мас-

сой 2,5 кг, падающего с высоты 30 см. После извлечения из ПСУ образцы помещались в камеру, обеспечивающую условия нормального твердения (при температуре (20 ± 2) °С, влажности (95 ± 5) % и атмосферном давлении), и хранились в течение 3, 7, 28 и 90 сут. Для испытания каждой смеси в определённом возрасте изготавливалось по 3 образца. Так же приготавливались контрольные образцы из суглинка без добавления извести в количестве 3 шт.

После хранения определялся предел прочности на сжатие образцов в проектном возрасте с использованием универсальной испытательной машины ИР 5082-100 при скорости перемещения поршня рабочего цилиндра (3,0 ± 0,3) мм/мин. Перед испытаниями образцы водонасыщали через слой капиллярно-увлажненного песка в течение трех суток.

Изучение влияния золы-уноса. Аналогично методике, описанной выше, были определены значения оптимальной влажности и максимальной плотности сухого грунта для данного грунта с добавлением 4, 8 и 12 % золы-уноса. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты определения максимальной плотности и оптимальной влажности

Table 4

Maximum density and best moisture of fly ash

Наименования показателя	Суглинок легкий пылеватый с добавлением золы-уноса в количестве			
	0	4 %	8 %	12 %
Оптимальная влажность, %	17,8	17,0	16,1	15,9
Максимальная плотность сухого грунта, г/см^3	1,77	1,79	1,82	1,85

Подготовленный грунт перемешивался с золой-уносом в количестве 4, 8 и 12 % по массе сухого грунта, хранился, формовался (при оптимальной влажности в соответствии с данными табл. 3) и испытывался аналогично методике, описанной выше.

Изучение комбинации извести и добавок-ускорителей. По методике, аналогичной приведенной выше, испытывались образцы с добавлением $CaCl_2$, $FeSO_4$, NaOH в количестве, равном 0,5 % от массы сухого грунта, для ускорения процесса твердения для $CaCl_2$ было выполнено дополнительное исследование с содержанием 1,0 %. Добавки вводились в грунт в порошкообразном виде на этапе перемешивания грунта и извести.

Влияние перерыва между перемешиванием и уплотнением смеси. Учет возможности хранения разработанного грунта потребовал проведения дополнительного исследования влияния времени хранения смеси на кинетику твердения грунтов, укреплённых гашеной известью. Для этого готовая перемешанная смесь грунта и извести хранилась в герметичном контейнере, для предотвращения потерь влаги, в течение 1, 3 и 10 сут. Затем были изготовлены образцы (по 6 образцов для каждой смеси), которые также испытывались по описанной выше методике и после приготовления хранились в условиях нормального твердения 28 и 90 сут.

Результаты и выводы

По данным, полученным в результате испытаний по определению предела прочности на сжатие грунта после обработки известью (рис. 1, *а*), можно сделать вывод, что введение извести увеличивает предел прочности на сжатие изученного суглинка до значений 0,9–1,4 МПа. В возрасте 28 сут образцы продолжают набирать прочность. Это подтверждает, что известь является медленнотвердеющим вяжущим [16, 17] и требуется дополнительное исследование использования добавок для ускорения набора прочности. Следует особо отметить, что даже минимальная дозировка извести 2 % дает увеличение предела прочности на сжатие в 9 раз после 90 сут твердения.

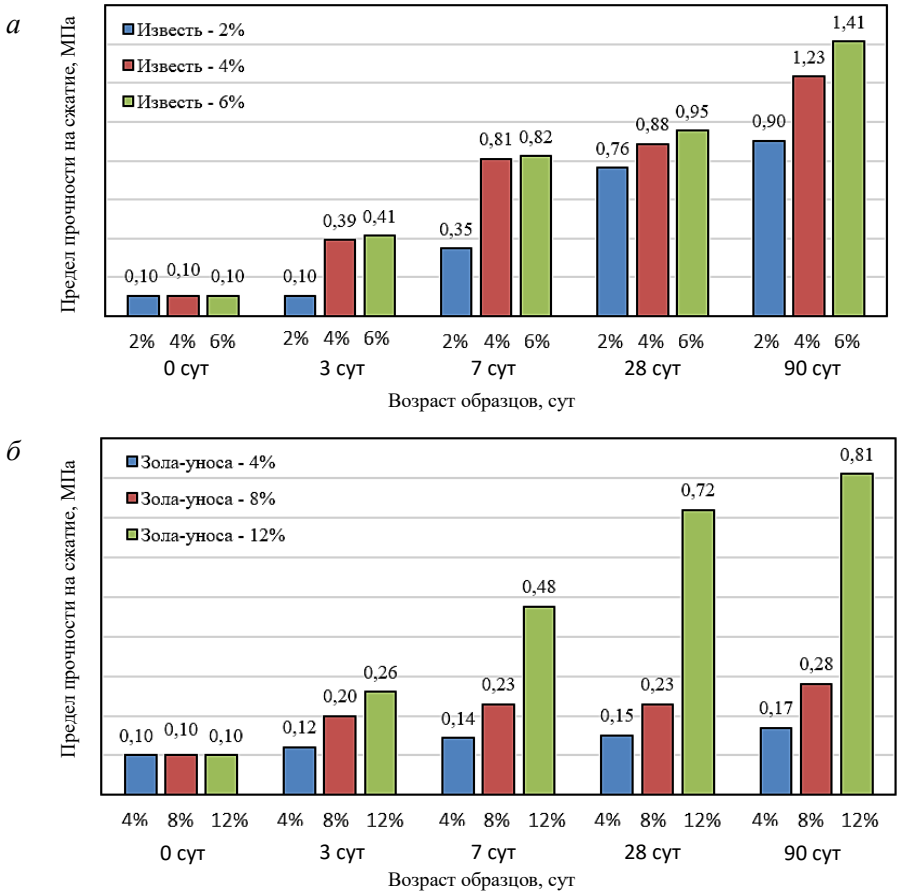

Рис. 1. Результаты определения предела прочности на сжатие суглинка легкого пылеватого при разном содержании вяжущего в различном возрасте:
а – извести; *б* – золы-уноса

Fig. 1. Compressive strength of light dusty loam at different binder content and age:
a – lime; *b* – fly ash

Результаты испытаний по определению предела прочности на сжатие грунта после воздействия золы-уноса (рис. 1, *б*) позволяют сделать вывод, что

введение золы-уноса увеличивает предел прочности на сжатие грунта меньше, чем введение извести (в 1,7–3,5 раза, если делать выводы по образцам в возрасте 90 сут). В возрасте 28 сут образцы продолжают набирать прочность. Это подтверждает, что зола-унос также является медленнотвердеющим вяжущим и её использование требует внесения добавок для ускорения набора прочности. Введение 4 и 8 % золы-уноса дает незначительный положительный эффект повышения предела прочности при сжатии, что в основном связано с низким содержанием оксида кальция, особенно его свободной формы.

Результаты испытаний по определению предела прочности на сжатие грунта при добавлении различного содержания извести и хлористого кальция (рис. 2) показывают, что добавление хлорида кальция способствует ускорению набора прочности.

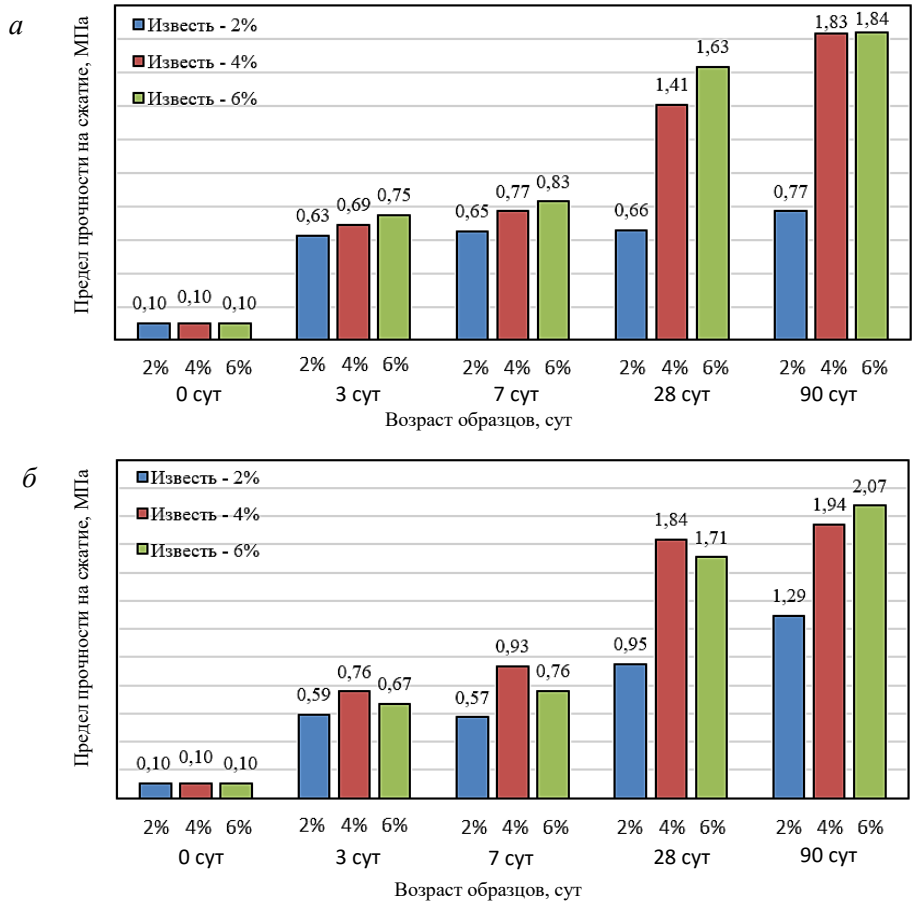

Рис. 2. Результаты определения предела прочности на сжатие суглинка легкого пылеватого при разном содержании гидратированной извести и добавлении хлористого кальция в различном возрасте:
а – содержание хлористого кальция 0,5 %; *б* – содержание хлористого кальция 1,0 %

Fig. 2. Compressive strength of light dusty loam with different content of hydrated lime and calcium chloride at different age:
a – 0.5 % calcium chloride; *b* –1.0 % calcium chloride

При этом добавка $CaCl_2$ в количестве 0,5 % является достаточной для значительного увеличения предела прочности на сжатие. Особенно хорошо это видно на образцах, содержащих 4 % извести, в возрасте 28 и 90 сут. Данный эффект может быть вызван ускорением схватывания на начальных этапах твердения, после чего часть связей была разрушена в процессе перемешивания и уплотнения. Кроме того, можно сделать вывод, что для данного грунта при применении $CaCl_2$ оптимальная добавка извести соответствует приблизительно 4 %, т. к. предел прочности данных образцов близок к пределу прочности образцов с содержанием 6 % извести.

Результаты опытов с добавлением $FeSO_4$ и NaOH при укреплении грунтов различным содержанием извести в различном возрасте образцов (рис. 3) показывают, что добавление $FeSO_4$ негативно влияет на процесс набора прочности образцов грунта, укрепленных известью.

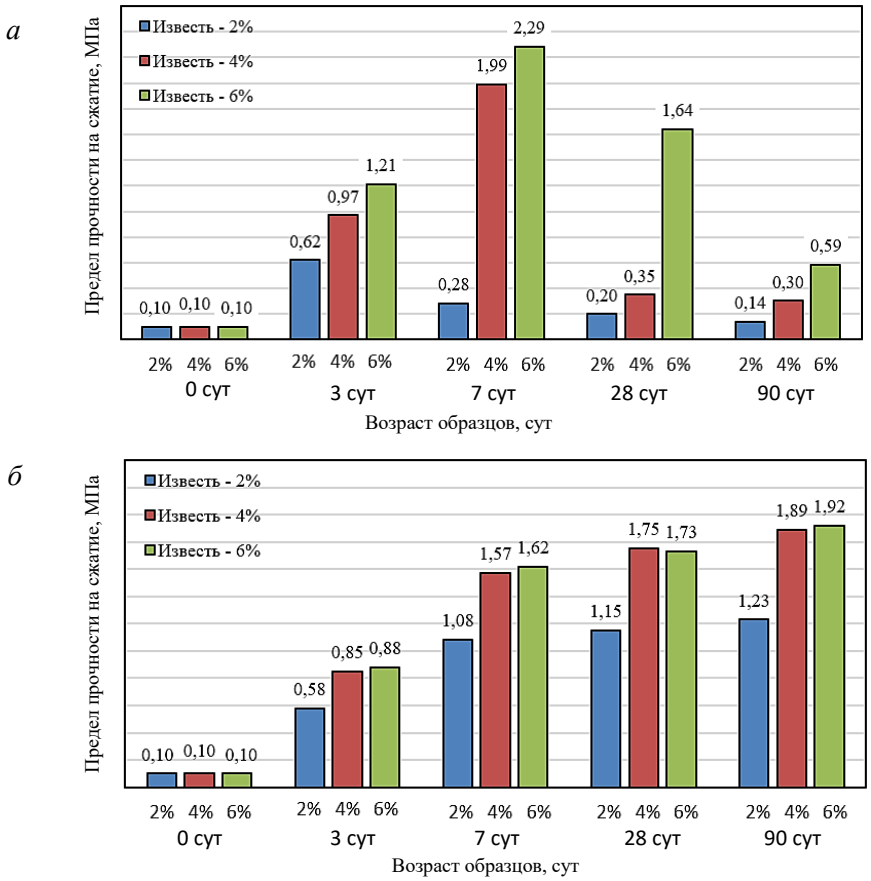

Рис. 3. Результаты определения предела прочности на сжатие суглинка легкого пылеватого при разном содержании гидратированной извести и 0,5 % добавок в различном возрасте:
а – сернокислого железа; *б* – гидроксида натрия

Fig. 3. Compressive strength of light powdery loam with different content of hydrated lime and 0.5 % of additives at different age:
a – ferrous sulfate; *b* – sodium hydroxide

Учитывая, что в процессе хранения образцов на них отмечались локальные разрушения, вызванные увеличением объема образцов, можно сделать вывод, что сульфат-ионы способствуют образованию минерала эттрингита (гидросульфоалюминат кальция) [31].

Реакции, происходящие в глинистом грунте при добавлении извести и сульфата железа, приведены ниже.

Распад извести на ионы; pH увеличивается до 12,3:

$$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2(OH)^- \quad (1)$$

Распад каолинита при pH > 10,5:

$$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 + 4(OH)^- + 10H_2O \rightarrow 4Al(OH)_4^- + 4H_4SiO_4 \quad (2)$$

Распад сульфата железа:

$$FeSO_4 \cdot 7H_2O \rightarrow Fe^{2+} + SO_4^{2-} + H_2O \quad (3)$$

Формирование эттрингита:

$$6Ca^{2+} + 2Al(OH)_4^- + 4(OH)^- + 3(SO_4)^{2-} + 26H_2O \rightarrow$$
$$\rightarrow Ca_6[Al(OH)_6]_2 \cdot (SO_4)_3 \cdot 26H_2O \quad (4)$$

Данный минерал содержит большое количество кристаллизованной воды, увеличивающей его размеры приблизительно в 2,5 раза. В результате этой реакции эттрингит разрывает образовавшиеся структурные связи, что, вероятно, является причиной потери образцами прочности в ходе проведения опыта.

В отличие от $FeSO_4$, внесенного с осушающим агентом (известью), добавление NaOH дает положительные результаты в отношении кинетики набора прочности образцов. По результатам испытаний видно, что процесс набора прочности практически закончился на седьмые сутки, при этом предел прочности на сжатие образцов более чем в 2 раза превысил прочность при введении других добавок.

По полученным результатам можно сделать вывод, что применение $CaCl_2$ и NaOH в качестве добавок к грунтам, укрепленным известью, положительно влияет на динамику твердения данных образцов. Но для каждой конкретной добавки для достижения максимального эффекта необходимо определение оптимального соотношения компонентов смеси, что требует дальнейших исследований по изучению их влияния на водо- и морозостойкость изучаемых материалов.

Влияние перерыва между смешением и уплотнением смеси. Результаты опытов по оценке снижения прочности укрепленного грунта в зависимости от времени между увлажнением извести и его уплотнением в различном возрасте образцов (рис. 4) позволяют сделать вывод о снижении предела прочности на сжатие при увеличении сроков выдерживания смеси перед уплотнением. За десять суток выдержки перед уплотнением укрепленный грунт потерял порядка 50 % своей прочности.

В ходе анализа полученных данных (рис. 4) была установлена зависимость, которая позволяет прогнозировать предел прочности на сжатие при определенных начальных условиях. Эмпирические соотношения, связывающие эти величины, представлены в виде формулы

$$R_t = R(1 - 0{,}18\ln(t)), \quad (5)$$

где R_t – предел прочности на сжатие образца материала при формовке после выдержки в течение t сут, МПа; R – предел прочности на сжатие образца материала при формовке непосредственно после увлажнения, МПа; t – количество суток, прошедших с момента увлажнения извести.

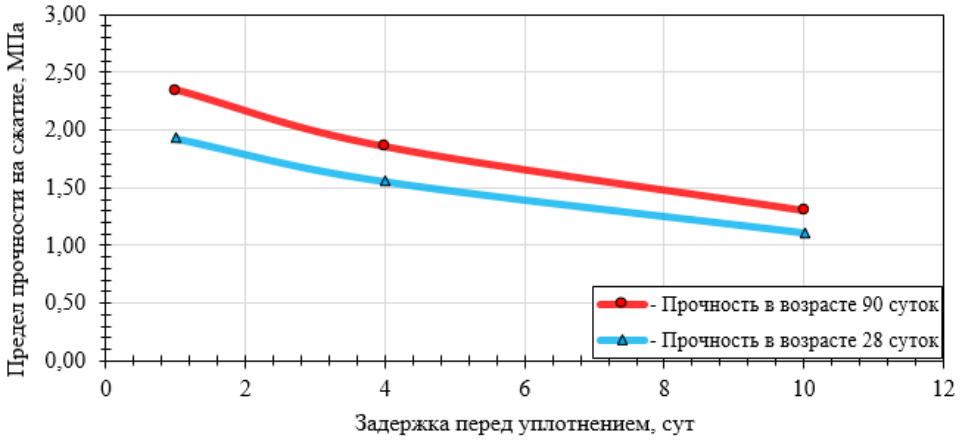

Рис. 4. Изменение прочности на сжатие при различном времени при уплотнении
Fig. 4. Compressive strength at different time before compaction

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы о свойствах грунтов, подвергшихся сосредоточенному воздействию извести:

– обработка известью грунтов увеличивает предел прочности на сжатие, а следовательно, повышает несущую способность слоя, что улучшает качество получаемого из такого грунта основания;

– введение золы-уноса увеличивает предел прочности на сжатие грунта меньше, чем известь (в 1,7–3,5 раза для образцов в возрасте 90 сут), при этом введение 4 и 8 % золы-уноса дает незначительный положительный эффект, что в основном связано с низким содержание оксида кальция, особенно его свободной формы;

– добавки хлористого кальция и гидроксида натрия (в количестве 0,5 %) ускоряют скорость твердения образцов, причем внесение хлористого кальция ускоряет набор прочности менее интенсивно;

– при увеличении интервала времени между перемешиванием смеси (грунт с добавлением извести) с водой и уплотнением данной смеси от 20 мин до 10 сут было отмечено снижение прочности получаемого материала на величину порядка 50 % от максимальной. Это связано с протеканием в материале пуццолановых реакций – образованием кристаллических связей, которые разрушаются при уплотнении смеси после выдерживания;

– необходимо провести оценку водостойкости и морозостойкости образцов с содержанием 2, 4 и 6 % гидратированной извести в комплексе с до-

бавками хлористого кальция и гидроксида натрия. Кроме того, целесообразно изучить изменение индекса непосредственной несущей способности (IPI), калифорнийского числа (CBR) и коэффициента фильтрации после сосредоточенного воздействия извести на глинистый грунт.

Список источников

1. *Yi Dong, Ning Lu, Patrick J. Fox*. Drying-Induced Consolidation in Soil // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2020. № 146 (9). P. 1–14. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002327
2. *Jebali H., Prikha W., Bouassida M.* Assessment of Carillo's Theory for Improved Tunis Soft Soil by Geodrains // Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013. P. 2509–2512.
3. *Manish V. Shah, Arvind V. Shroff*. Soil-Structur Soil-Structure Inter e Interaction of Soft Cla action of Soft Clay Using Pr y Using Prefabricated V efabricated Vertical Geodrains Under Seismic Stresses // Missouri University of Science and Technology. 2010. № 5.53a. P. 1–8.
4. *Sven Hansbo*. Consolidation of clay, with special reference to influence of vertical sand drains // Swedish geotechnical institute proceedings. 1960. № 18. P. 1–166.
5. *Leelamanie D.A.L.* Changes in Soil Water Content with Ambient Relative Humidity in Relation to the Organic Matter and Clay // Tropical Agricultural Research and Extension. 2010. № 13. P. 6–10. DOI: 10.4038/tare.v13i1.3130
6. *Lucas Martina, Vahid Alizadehb, Jay Meegodaa*. Electro-osmosis treatment techniques and their effect on dewatering of soils, sediments, and sludge: A review // Soils and Foundations. 2019. № 59. P. 407–418. DOI: 10.1016/j.sandf.2018.12.015
7. *Estabragh A.R., Naseh M., Javad A.A.* Improvement of clay soil by electro-osmosis technique // Electrochimica Acta. 2015. № 95. P. 32–36. DOI: 10.1016/j.clay.2014.03.019
8. *Jayasekera S.* Electrokinetics to Modify Strength Characteristics of Soft Clayey Soils: A Laboratory Based Investigation // Applied Clay Science. 2015. V. 181. № 6. P. 39–47.
9. *Ali Akbar Firoozi, C. Guney Olgun, Ali Asghar Firoozi, Mojtaba Shojaei Baghini*. Fundamentals of soil stabilization // International Journal of Geo-Engineering. 2017. № 26. P. 1–16. DOI: 10.1186/s40703-017-0064-9
10. *Chang-Yu Ou, Shao-Chi Chien, Yi-Guang Wang*. On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions // Applied Clay Science. 2009. № 44. P. 130–136. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000819
11. *Abdullah W.S., Al-Abadi A.M.* Cationic – electrokinetic improvement of an expansive soil // Applied Clay Science. 2010. № 47. P. 343–350. DOI: 10.1016/j.clay. 2009.11.046
12. *Amir Hossein Vakili, Mohammad Kaedi, Mehdi Mokhberi, Mohamad Razip bin Selamat, Mahdi Salim*. Treatment of highly dispersive clay by lignosulfonate addition and electroosmosis application // Applied Clay Science. 2018. № 152. P. 1–8. DOI: 10.1016/J.CLAY.2017.11.039
13. *Prusinski J., Bhattacharja S.* Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils // Transportation Research Record. 1999. №. 1652. P. 215–227. DOI: 10.3141/1652-28
14. *Ramdane Bahar, Mouloud Benazzoug, Said Kenai*. Durability of earth stabilized material // Key Engineering Materials. 2014. № 600. P. 495–503. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.600.495
15. *Young-sang Kim, Thien Quoc Tran, Gyeong-o Kang, Tan Manh Do*. Stabilization of a residual granitic soil using various new green binders // Construction and Building Materials. 2019. № 223. P. 724–735. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.019
16. *John E. Sani, Roland Kufre Etim, Alexander Joseph*. Compaction Behaviour of Lateritic Soil–Calcium Chloride Mixtures // Geotech Geol Eng. 2018. P. 1–20. DOI: 10.1007/s10706-018-00760-6
17. *Ramana Murty V., Hari Krishna P.* Amelioration of Expansive Clay Slopes Using Calcium Chloride // Journal of materials in civil engineering. 2007. P. 19–25. DOI: 10.1680/GRIM.2006.10.1.39
18. *Bahram Ta'negonbadi, Reza Noorzad*. Stabilization of clayey soil using lignosulfonate // Transportation Geotechnics. 2017. P. 1–38. DOI: 10.1016/J. TRGEO.2017.08.004

19. *Слободчикова Н.А.* Научные основы подбора состава грунтов, укрепленных известью // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2017. № 4. С. 1–7.
20. *Little D.N.* Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime, Kendall. Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa, 1995. 219 p.
21. *Lawrence W., Timothy Shevlin, Stave Tutokey, Joel Beeghly*. The Effects of Various Lime Products for Soil Drying // Technical Report Carmeuse Lime Company. 2007. P. 1–10.
22. *Emmanuel Sunday Ajayi*. Improv Effect of Lime Variation on the Moisture Content and Dry Density of Lateritic Soil in Ilorin, Nigeria // Int. J. Forest, Soil and Erosion. 2012. №. 2 (4). P. 159–162.
23. *Noor S.T., Uddin R.* Effect of Lime Stabilization on the Alteration of Engineering Properties of Cohesive Soil // Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019. P. 1257–1267. DOI: 10.1007/978-981-10-8016-6_88
24. *Mamatha K.H., Dinesh S.V.* Resilient modulus of black cotton soil // International Journal of Pavement Research and Technology. 2017. P. 1–41. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.01.008
25. *Mavroulidou M., Zhang X., Michael J. Gunn, Cabarkapa Z.* Water Retention and Compressibility of a Lime-Treated, High Plasticity Clay // Geotech Geol Eng. 2013. P. 1171–1185. DOI: 10.1007/s10706-013-9642-6
26. *Khattab S.A.A., Al-Mukhtar M., Fleureau J.-M.* Long-Term Stability Characteristics of a Lime-Treated Plastic Soil // Journal of materials in civil engineering. 2007. P. 358–366. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:4(358)
27. *Bhaskar C.S. Chittoori, Anand J. Puppala, Aravind Pedarla*. Addressing Clay Mineralogy Effects on Performance of Chemically Stabilized Expansive Soils Subjected to Seasonal Wetting and Drying // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2018. P. 1–25. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001796
28. *López-Laraa T., Hernández-Zaragozaa J.B., Horta-Rangela J., Rojas-Gonzáleza E., López-Ayalab S., Castañob V.M.* Expansion reduction of clayey soils through Surcharge application and Lime Treatment // Case Studies in Construction Materials. 2017. №. 7. P. 102–109. DOI: 10.1016/j.cscm.2017.06.003
29. *Guillaume Stoltz, Olivier Cuisinier, Farimah Masrouri*. Weathering of a lime-treated clayey soil by drying and wetting cycles // Engineering Geology. 2014. №. 181. P. 281–289. DOI: 10.1016/J. ENGGEO.2014.08.013
30. *Asmaa Al-Taie, Disfani M., Evans R., Arulrajah A.* Collapse and Swell of Lime Stabilized Expansive Clays in Void Ratio–Moisture Ratio–Net Stress Space // Int. J. Geomech. 2019. № 19. P. 1–15. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001488
31. *Pat Harris, Tom Scullion, Stephen Sebesta*. Hydrated lime stabilization of sulfate-bearing soils in texas // Technical Report Documentation Page. 2004. № FHWA/TX-04/0-4240-2. P. 46.

REFERENCES

1. *Yi Dong, Ning Lu, Patrick J. Fox*. Drying-induced consolidation in soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2020; 146 (9): 1–14. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002327
2. *Jebali H., Prikha W., Bouassida M.* Assessment of Carillo's theory for improved Tunis soft soil by geodrains. In: *Proc. 18th Int. Conf. Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013. Pp. 2509–2512.
3. *Manish V. Shah, Arvind V. Shroff*. Soil-structure interaction of soft clay using prefabricated vertical geodrains under seismic stresses. *Missouri University of Science and Technology*. 2010; (5.53a): 1–8.
4. *Sven Hansbo*. Consolidation of clay, with special reference to influence of vertical sand drains. *Swedish Geotechnical Institute Proceedings*. 1960; (18): 1–166.
5. *Leelamanie D.A.L.* Changes in soil water content with ambient relative humidity in relation to the organic matter and clay. *Tropical Agricultural Research and Extension*. 2010;(13): 6–10. DOI: 10.4038/tare.v13i1.3130
6. *Lucas Martina, Vahid Alizadehb, Jay Meegodaa*. Electro-osmosis treatment techniques and their effect on dewatering of soils, sediments, and sludge: A review. *Soils and Foundations*. 2019; (59): 407–418. DOI: 10.1016/j.sandf.2018.12.015

7. *Estabragh A.R., Naseh M., Javad A.A.* Improvement of clay soil by electro-osmosis technique. *Electrochimica Acta*. 2015; (95): 32–36. DOI: 10.1016/j.clay.2014.03.019
8. *Jayasekera S.* Electrokinetics to modify strength characteristics of soft clayey soils: A laboratory based investigation. *Applied Clay Science*. 2014; 181 (6): 39–47.
9. *Ali Akbar Firoozi, C. Guney Olgun, Ali Asghar Firoozi, Mojtaba Shojaei Baghini*. Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering.* 2017; (26): 1–16. DOI: 10.1186/s40703-017-0064-9
10. *Chang-Yu Ou, Shao-Chi Chien, Yi-Guang Wang.* On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions. *Applied Clay Science*. 2009; (44): 130–136. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000819
11. *Abdullah W.S., Al-Abadi A.M.* Cationic-electrokinetic improvement of an expansive soil. *Applied Clay Science*. 2010. (47): 343–350. DOI: 10.1016/j.clay. 2009.11.046
12. *Amir Hossein Vakili, Mohammad Kaedi, Mehdi Mokhberi, Mohamad Razip bin Selamat, Mahdi Salim*. Treatment of highly dispersive clay by lignosulfonate addition and electroosmosis application. *Applied Clay Science*. 2018; (152): 1–8. DOI: 10.1016/J. CLAY.2017.11.039
13. *Prusinski J., Bhattacharja S.* Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils. *Transportation Research Record*. 1999; (1652): 215–227. DOI: 10.3141/1652-28
14. *Ramdane Bahar, Mouloud Benazzoug, Said Kenai*. Durability of earth stabilized material. *Key Engineering Materials.* 2014; (600): 495–503. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.600.495
15. *Young-sang Kim, Thien Quoc Tran, Gyeong-o Kang, Tan Manh Do*. Stabilization of a residual granitic soil using various new green binders. *Construction and Building Materials*. 2019; (223): 724–735. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.019
16. *John E. Sani, Roland Kufre Etim, Alexander Joseph*. Compaction behaviour of lateritic soil–calcium chloride mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2018; 1–20. DOI: 10.1007/s10706-018-00760-6
17. *Ramana Murty V., Hari Krishna P.* Amelioration of expansive clay slopes using calcium chloride. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2007; 19–25. DOI: 10.1680/GRIM. 2006.10.1.39
18. *Bahram Ta'negonbadi, Reza Noorzad*. Stabilization of clayey soil using lignosulfonate. *Transportation Geotechnics*. 2017; 1–38. DOI: 10.1016/J. TRGEO.2017.08.004
19. *Slobodchikova N.A.* Scientific basis for the selection of lime reinforced soils. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*. 2017. (4): 1–7. (In Russian)
20. *Little D.N.* Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime, Kendall. Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa, 1995.
21. *Lawrence W., Timothy Shevlin, Stave Tutokey, Joel Beeghly*. The effects of various lime products for soil drying. In: Technical Report Carmeuse Lime Company. 2007. Pp. 1–10.
22. *Emmanuel Sunday Ajayi*. Improvement Effect of lime variation on the moisture content and dry density of lateritic soil in Ilorin, Nigeria. *International Journal of Forest, Soil and Erosion*. 2012; 2 (4): 159–162.
23. *Noor S.T., Uddin R.* Effect of lime stabilization on the alteration of engineering properties of cohesive soil. Springer Nature Singapore Pte. Ltd., 2019. Pp. 1257–1267. DOI: 10.1007/978-981-10-8016-6_88
24. *Mamatha K.H., Dinesh S.V.* Resilient modulus of black cotton soil. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017; 1–41. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.01.008
25. *Mavroulidou M., Zhang X., Michael J. Gunn, Cabarkapa Z.* Water retention and compressibility of a lime-treated, high plasticity clay. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2013; 1171–1185. DOI: 10.1007/s10706-013-9642-6
26. *Khattab S.A.A., Al-Mukhtar M., Fleureau J.-M.* Long-term stability characteristics of a lime-treated plastic soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2007. Pp. 358–366. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:4(358)
27. *Bhaskar C.S., Chittoori, Anand J. Puppala, Aravind Pedarla*. Addressing clay mineralogy effects on performance of chemically stabilized expansive soils subjected to seasonal wetting and drying. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2018; 1–25. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001796
28. *López-Laraa T., Hernández-Zaragozaa J.B., Horta-Rangela J., Rojas-Gonzáleza E., López-Ayalab S., Castañob V.M.* Expansion reduction of clayey soils through Surcharge application

and lime treatment. *Case Studies in Construction Materials*. 2017; (7): 102–109. DOI: 10.1016/j.cscm.2017.06.003
29. *Guillaume Stoltz, Olivier Cuisinier, Farimah Masrouri*. Weathering of a lime-treated clayey soil by drying and wetting cycles. *Engineering Geology*. 2014; (181): 281–289. DOI: 10.1016/J. ENGGEO.2014.08.013
30. *Asmaa Al-Taie, Disfani M., Evans R., Arulrajah A.* Collapse and swell of lime stabilized expansive clays in void ratio–moisture ratio–net stress space. *International Journal of Geomechanics*. 2019; (19): 1–15. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001488
31. *Pat Harris, Tom Scullion, Stephen Sebesta*. Hydrated lime stabilization of sulfate-bearing soils in Texas. Technical Report Documentation, Report No. FHWA/TX-04/0-4240-2, 2004. P. 46.

Сведения об авторах

Алькаев Евгений Николаевич, аспирант, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, 644080, г. Омск, пр. Мира, 5, alkaev.en@yandex.ru

Лунёв Александр Александрович, канд. техн. наук, доцент, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, 644080, г. Омск, пр. Мира, 5, lunev.al.al@gmail.com

Authors Details

Evgeny N. Alkaev, Research Assistant, Siberian State Automobile and Highway University, 5, Mira Ave., 644080, Omsk, Russia, alkaev.en@yandex.ru

Aleksandr A. Lunev, PhD, A/Professor, Siberian State Automobile and Highway University, 5, Mira Ave., 644080, Omsk, Russia, lunev.al.al@gmail.com

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 19.12.2022
Одобрена после рецензирования 11.05.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 19.12.2022
Approved after review 11.05.2023
Accepted for publication 16.05.2023