Научная статья
 УДК 625.7.8, 624.132, 624.138
 DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-800-810>

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА СОСРЕДОТОЧЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗВЕСТИ

Е.Н. Алькаев, А.А. Лунёв, В.В. Голубенко

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
 г. Омск, Россия

alkaev.en@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9344-0643>,
lunev.al.al@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5857-1891>,
v-golubenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3973-6122>

АННОТАЦИЯ

Введение. Обилие в Сибирском федеральном округе источников глинистых грунтов с влажностью выше оптимальной существенно усложняет технологию производства работ, снижает скорость работы, а также делает некоторые резервы непригодными для использования. Для решения этих проблем была рассмотрена возможность использования негашёной извести для подготовки к разработке карьеров с глинистыми грунтами с влажностью выше оптимальной.

Были проведены экспериментальные исследования по изучению динамики осушения грунта (суглинка легкого пылеватого) в результате бурения скважины, которая заполнялась негашёной известью (метод сосредоточенного воздействия извести). В ходе данного исследования выполнено три эксперимента над массивами грунта с различной начальной влажностью, два из которых проводились при воздействии извести и один (контрольный) без её воздействия.

Дополнительно была проведена оценка изменения оптимальной влажности и максимальной плотности сухого грунта при введении извести в суглинистый грунт (дозировка от 2 до 6% по массе). На основе полученных результатов и анализа литературных источников обоснованы рациональные расстояния между прорезями (скважинами) при использовании технологии сосредоточенного воздействия извести для осушения грунтов с повышенной влажностью в карьерах.

Обсуждение и заключение. На основании полученных в ходе исследования результатов, можно сделать вывод, что осушение грунта известью предложенным методом сосредоточенного воздействия оказывает положительный эффект на физико-механические показатели грунта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, автомобильные дороги, техническая мелиорация, стабилизация грунтов, подготовка карьеров, глинистые грунты, известь

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 05.10.2021; одобрена после рецензирования 10.2021; принята к публикации 14.12.2021.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Алькаев Е.Н., Лунёв А.А., Голубенко В.В. Изучение свойств глинистого грунта при использовании метода сосредоточенного воздействия извести // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 800-810. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-800-810>

© Алькаев Е.Н., Лунёв А.А., Голубенко В.В., 2021

Контент доступен под лицензией
 Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-800-810>

STUDY OF CLAY SOIL PROPERTIES WHEN USING THE METHOD OF CONCENTRATED LIME EXPOSURE

Evgeniy N. Alkaev, Alexander A. Lunev, Vladimir V. Golubenko

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),

Omsk, Russian Federation

alkaev.en@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9344-0643>

lunev.al.al@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5857-1891>

v-golubenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3973-6122>

ABSTRACT

Introduction. In the Siberian Federal Area, the abundance of clay soils sources with above-optimal moisture content significantly complicates the technology of operations, reduces the speed of work, and makes some reserves unusable. To solve these problems, the use of quicklime in preparation for quarrying of clay soils with above-optimal moisture content was considered.

The experimental studies have been carried out on the dynamics of soil drainage (lightweight dust loam) from drilling a well filled with lightweight lime (concentrated lime method). During this study, three experiments were carried out on soil masses with different initial humidity, two of which were carried out under the influence of lime and one (control) without the effect thereof.

In addition, the change in optimum humidity and maximum density of dry soil during lime injection into loamy soil (dosage from 2% to 6% by mass) was evaluated. On the basis of the results obtained and the analysis of literature sources rational distances between slots (wells) are justified when using concentrated lime action technology to drain soils with increased humidity in quarries.

Negotiations and conclusions. On the basis of the results obtained in the course of the study, it can be concluded that drying the soil with lime by the proposed concentrated method has a positive effect on the physical and mechanical characteristics of the soil.

KEYWORDS: construction, roads, technical reclamation, soil stabilisation, quarry preparation, clay soils, lime.

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors would like to thank the editors of the Russian Automobile and Highway Industry Journal and the reviewers of the article.

The article was submitted 05.10.2021; approved after reviewing 07.10.2021; accepted for publication 14.12.2021.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods.

There is no conflict of interest.

For citation: E. N. Alkaev, A. A. Lunev, Golubenko V.V. Study of clay soil properties when using the method of concentrated lime exposure. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2021; 18 (6): 800-810. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-800-810>

© Alkaev E.N., Lunev A.A., Golubenko V.V., 2021

Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современной рыночной экономики часто под карьеры отводят наименее ценные территории. Данные резервы сложены глинистыми грунтами, имеющими влажность выше допустимой. При попытках использования в земляном полотне таких глинистых грунтов возникают проблемы уплотнения, а деформативность земляного полотна может увеличиваться в 3–4 раза [1, 2, 3, 4].

В подобной ситуации требуется применять методы технической мелиорации грунтов (например методы стабилизации) [5] для доведения переувлажненных грунтов до кондиционного состояния. Однако традиционные методы мелиорации в основном требуют предварительной разработки грунта и проведение дальнейших мероприятий по его осушению. При разработке такого грунта отмечается повышенное налипание на рабочие органы, что снижает производительность, кроме того, наличие влаги понижает прочностные параметры грунта, что может вести к оползанию забоя. По результатам работы [6] можно сделать вывод, что при увеличении водонасыщения угол внутреннего трения и удельное сцепления грунта уменьшаются, а при увеличении плотности угол внутреннего трения и удельное сцепления грунта увеличиваются.

Каждый из традиционных методов снижения влажности имеет и дополнительные недостатки. Так, низкая несущая способность вместе с повышенной липкостью затрудняют использование методов радиационного осушения, особенно в регионах с высоким количеством осадков.

При использовании химических способов мелиорации помимо разработки требуется перемешивание химической добавки и массива грунта с более допустимой влажностью, что весьма осложняется налипанием глинистого грунта и невозможностью измельчения грунта, необходимого для равномерного перемешивания. Россыпь реагентов по поверхности грунта не дает ощутимого результата, поскольку образование корки сухого грунта, атмосферные осадки и ветер негативно сказываются на качестве работ. Также ветром могут уноситься пылевидные частицы реагентов, что способствует загрязнению территорий и может влиять на здоровье персонала [11].

При введении гранулометрических добавок к проблеме налипания и невозможности измельчения грунта добавляется проблема неоднородности механических свойств полученного материала. Изменение прочностных и деформационных параметров грунта, связанное со сложностью равномерного перемешивания глинистого грунта с добавкой, необходимо учитывать на этапе проектирования сооружения. Что, как правило, приводит к удорожанию получаемого материала и снижению его прочностных показателей.

Одним из нетрадиционных, но перспективных способов технической мелиорации грунтов является электрохимическая обработка, основанная на воздействии на грунт электромагнитного поля [5, 7]. Этот способ заключается в пропускании через влажный грунт постоянного электрического тока, который подается в массив посредством погружения в него металлических электродов. При этом полярные молекулы воды устремляются к отрицательно заряженному перфорированному электроду-катоде, из которого вода удаляется. Однако использование этого метода требует наличия высококвалифицированных специалистов, сложного оборудования и высокой культуры производства работ.

Также возможно комплексное воздействие, например, введение химических реагентов с помощью электромагнитного поля [8, 9, 10].

По причине наличия недостатков существующих методов осушения грунтов в карьерах был предложен новый, комбинирующий особенности некоторых других, метод сосредоточенного воздействия негашёной извести. Сосредоточенное воздействие подразумевает устройство вертикальных скважин или прорезей определенных размеров в грунте и заполнение их размельченной негашёной известью с трамбованием. Осушение глинистого грунта с повышенной влажностью достигается за счет химической реакции (экзотермической) негашёной извести с водой.

Кроме осушения, введение извести способствует укреплению связных грунтов и приводит к следующим коренным преобразованиям их физико-механических свойств [11]:

- снижение пластичности^{1, 2};
- увеличение значений допустимой влажности и снижение максимальной плотности сухого грунта^{1, 2};

¹. Могилевич В.М., Щербаков Р.П., Тюменцева О.В. Дорожные одежды из цементогрунта. М.: Транспорт, 1973. 216 с.

². Левчановский Г.Н., Марков Л.А., Попандопуло Г.А. Укрепление грунтов известью в дорожном и аэродромном строительстве. М.: Транспорт, 1977. 149 с.

Таблица 1
Физико-механические свойства грунта

Table 1
Physical and mechanical properties of the soil

Наименование показателя	Фактические данные	Ед. изм.
1. Влажность на границе текучести	31,8	%
2. Влажность на границе раскатывания	18,8	%
3. Число пластичности	13	-
4. Оптимальная влажность	18,1	%
5. Максимальная плотность скелета грунта	1,71	г/см ³
6. Плотность частиц грунта	2,72	г/см ³
6. Содержание песчаных частиц (2–0,05 мм)	4,5	%
7. Ph водной вытяжки	9,13	
8. Емкость катионного обмена	7,7	г _{экв} /100 гр
9. Потери при прокаливании	7,62	%

- улучшение обрабатываемости и уплотняемости глинистых грунтов;
- практически ликвидирует усадку и набухание^{1, 2};
- значительно увеличиваются прочностные характеристики глинистых грунтов^{1, 2};
- увеличение водоустойчивости^{1, 2}.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Суглинок легкий пылеватый

Для испытаний в карьере первого кирпичного завода (г. Омск), расположенного по GPS координатам 55.034498, 73.516907, были отобраны пробы суглинка легкого пылеватого, который является весьма распространённым видом грунтов в регионе. Перед проведением испытаний были определены его физико-механические показатели, которые приведены в таблице 1.

Молотая негашёная известь

Для опыта была использована молотая негашёная известь третьего сорта. По условиям твердения – воздушная, по содержанию оксидов кальция и оксидов магния – кальциевая. Содержание оксида кальция составило 73%, а оксида магния – 4%. По времени гашения данная известь относится к среднегасящейся.

Также для создания более однородной массы из извести удалялись крупные частицы методом просеивания через сито с ячейками 1 мм.

Исследование динамики осушения грунта при сосредоточенном воздействии извести

Подготовка образцов для исследования динамики осушения

В целях изучения динамики осушения грунта был изготовлен лоток из водостойкой древесной плиты размером 0,5х0,5х1,1 м, на внутреннюю часть которого был нанесен слой гидроизоляции для увеличения водостойкости и герметичности.

До уплотнения грунта в лоток устанавливалась пластиковая труба диаметром 0,06 м для создания полости, облегчающей заполнение ее негашёной известью после её извлечения. Далее грунт послойно загружался в лоток и увлажнялся до начальной влажности (опыт № 1 – 38,1%, опыт № 2 – 29,6%, опыт № 3 – 26,1%). Из-за неравномерности распределения влаги по толще грунта он выдерживался сутки в закрытом пленкой лотке перед началом опыта.

При подготовке образца была осуществлена попытка добиться естественной плотности грунта трамбованием. Однако вследствие переувлажнения любые попытки механического воздействия не позволяли добиться даже минимального коэффициента уплотнения $K_u=0,90$ (происходило выдавливание грунта из-под трамбующих устройств).

По тем же принципам загружался лоток для второго опыта с другой начальной влажностью, после чего выполнялся третий опыт (контрольный) для оценки динамики естественного осушения грунта в лотке без воздействия извести.

Для оценки результатов уплотнения отбирались пробы методом режущего кольца, результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2
Результаты определения коэффициента уплотнения

Table 2
Results of the compaction factor determination

Расстояние от скважины с известью, м	$W_{\text{факт}}, \%$	$W_{\text{опт}}, \%$	$\rho_{\text{макс}}, \text{г/см}^3$	$\rho_{\text{вл}}, \text{г/см}^3$	$\rho_{\text{ск}}, \text{г/см}^3$	$K_{\text{упл.факт.}}$
Опыт №1						
0,15	37,98	18,10	1,71	1,82	1,32	0,77
0,45	38,15	18,10	1,71	1,78	1,29	0,75
0,65	38,21	18,10	1,71	1,78	1,29	0,75
0,90	38,41	18,10	1,71	1,81	1,31	0,76
Опыт №2						
0,15	25,93	18,10	1,71	1,98	1,57	0,92
0,45	25,39	18,10	1,71	1,95	1,56	0,91
0,65	25,55	18,10	1,71	1,94	1,54	0,90
0,90	25,47	18,10	1,71	1,94	1,54	0,90
Опыт №3						
0,15	29,98	18,10	1,71	1,95	1,50	0,88
0,45	30,17	18,10	1,71	1,94	1,49	0,87
0,65	29,63	18,10	1,71	1,95	1,50	0,88
0,90	29,04	18,10	1,71	1,93	1,50	0,87

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

После уплотнения в полость от трубки засыпалась молотая негашёная известь в количестве 1,13 кг. Уплотнив ее, аккуратно из грунта удалялась пластиковая трубка и излишки извести. Лоток накрывался полиэтиленовой пленкой и закрывался крышкой.

Через определенное время (2–7 дней) в четырех точках лотка на расстоянии 0,15, 0,40, 0,65 и 0,90 м от скважины с известью с помощью бура отбирались по три пробы по толщине грунта для определения влажности методом высушивания до постоянной массы. Фотография с местами отбора проб представлена на рисунке 1.

а

б

Рисунок 1 – Отбор проб на влажность:
а – расположение точек отбора проб в лотке; б – отбор проб с помощью бура

Figure 1 – Moisture sampling: a – location of sampling points in the tray; b – drill sampling

Рисунок 2 – Динамика осушения массива суглинка в ходе экспериментальных исследований

Figure 2 – Drying dynamics of the loam in experimental studies

Изучение изменения оптимальной влажности и максимальной плотности сухого грунта

Также исследовались изменения оптимальной влажности и максимальной плотности сухого грунта с различным содержанием извести и без её добавления.

Высушенный и измельченный грунт перемешивался с различной дозировкой гидратированной извести (известь добавлялась в количестве 2%, 4% и 6% от массы сухого грунта). После равномерного распределения извести по массе грунта добавлялась вода, начиная с 14% от массы сухого грунта и далее с шагом 2%. После чего с использованием метода стандартного уплотнения определялись оптимальная влажность и максимальная плотности сухого грунта. Результаты представлены на рисунке 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты исследования динамики осушения грунта при сосредоточенном воздействии извести

Опыт № 1 – осушение суглинка негашёной известью ($W_{нач} = 38,1\%$)

В первом опыте переувлажненный грунт с влажностью 38,1% ($K_{увл} = 2,10$) был уплотнен до коэффициента уплотнения 0,78. В ходе опыта на 2-е, 6-е, 13-е сут отбирались пробы

для определения влажности. Динамика осушения показана на рисунке 2.

Анализируя график, видно что изменение влажности стабилизировалось за 6 сут, при этом влажность снизилась на 4,1%.

Опыт № 2 – осушение суглинка негашёной известью ($W_{нач} = 26,1\%$)

Во втором опыте переувлажненный грунт с влажностью 26,1% ($K_{увл} = 1,44$) был уплотнен до коэффициента уплотнения 0,93. В ходе опыта на 3-и, 7-е, 14-е сут отбирались пробы для определения влажности. Динамика осушения показана на рисунке 2.

По графику видно, что влажность на всем протяжении времени уменьшалась равномерно и за 14 сут уменьшилась на 4,1%. После чего так же, как и в опыте она стабилизировалась.

Опыт № 3 – естественное осушение суглинка ($W_{нач} = 29,6\%$)

В третьем опыте переувлажненный грунт с влажностью 29,6% ($K_{увл} = 1,64$) был уплотнен до коэффициента уплотнения 0,90. В данном опыте известь не добавлялась, а грунт осушался за счет естественного испарения влаги. В ходе опыта на 5-е, 12-е, 19-е сут отбирались пробы для определения влажности. Динамика осушения показана на рисунке 2.

По графику видно, что влажность за 5 сут уменьшилась на 0,63%, а за 19 сут – всего на 1,96%.

Рисунок 3 – Изменение значений плотности сухого грунта и оптимальной влажности в зависимости от дозировок извести

Figure 3 – Changes in dry soil density and optimal humidity according to lime doses

Динамика осушения во всех опытах дает возможность понять, что одинаковое (0,5% от массы грунта) количество извести снижает влажность приблизительно на 4%, при этом в зависимости от влажности и плотности меняются сроки, в течение которых происходит осушение (в процессе гидратации извести). Также на скорость осушения грунта, вероятно, оказывает влияние коэффициент уплотнения грунта [18, 19].

По результатам опыта № 3 можно сделать вывод, что грунт в данных экспериментах осушается ещё за счет естественных условий. Влажность грунта за 12 сут уменьшилась на 1,4%.

Проанализировав результаты осушения, можно сделать вывод о возможности осушения грунта методом сосредоточенного воздействия извести. Но устройство вертикальных скважин не позволяет рациональное размещение достаточного количества извести, кроме этого осушение грунта происходит недостаточно интенсивно.

Исследование изменения значений плотности сухого грунта и оптимальной влажности в зависимости от дозировок извести

По результатам (рисунок 3), полученным с помощью прибора стандартного уплотнения, видно, что введение гашеной извести способствует увеличению оптимальной влажности и снижению максимальной плотности сухого грунта, что подтверждает результаты исследований, описанных в [12, 13, 14, 16, 17].

Оптимальная влажность увеличилась с 18,1% (для грунта без добавок) до 22,3% (для грунта с добавлением 4% извести). При этом максимальная плотность сухого грунта снизилась с 1,71 (для грунта без добавок) до 1,58 г/см³ (для грунта с добавлением 4% извести). Также по графикам уплотнения грунта оптимальная влажность равна 22,3 и 21,8% для дозировок извести 4 и 6% соответственно, можно сделать вывод, что существует оптимальная дозировка извести, позволяющая максимально увеличить оптимальную влажность [21, 22].

Введение извести в глинистые грунты приводит к увеличению значений оптимальной влажности и снижению максимальной плотности сухого грунта, тем самым изменяя границы допустимой влажности, смещая эту границу в сторону больших значений. Следовательно, грунт необходимо осушать на меньшую величину.

Причина этого явления заключается в изменении структуры грунта, так как в результате реакций между грунтом и известью изменяются связи в полученном материале. Образуются кристаллизационные и коагуляционные связи между частицами [13]. Новая образованная структура укрепленного грунта имеет большее количество порового пространства, значит снижается и плотность сухого материала, поэтому для ее уплотнения требуется большее количество воды, а следовательно, и увеличивается влажность. При этом стоит учитывать, что вводимая известь имеет меньшую плотность по отношению к грунту, что тоже влияет на плотность сухого материала.

Вывод зависимости для определения дозировки извести, необходимой для изменения влажности грунта.

Как было описано ранее, негашёная известь вводится в грунт посредством нарезанных вертикальных траншей (скважин) заданной глубины и ширины (диаметра). Г.Н. Левчановский в своих работах описывал реакцию гашения молотой негашёной извести, протекающей с выделением тепла, которое в значительной мере поглощается водой с повышением температуры смеси [10]. Реакция протекает по формуле

В предлагаемой нами технологии известь начинает реагировать с водой, находящейся в грунте, таким образом уменьшая влажность тонкого слоя грунта, находящегося вдоль устраиваемой прорези. Далее за счет реакции влагопереноса из полости грунта вода начинает перемещаться в сторону наименьшей влажности, а именно в сторону грунтов, влажность которых уменьшилась за счет реакции гашения извести.

Так как повышение температуры за счет выделения тепла при гашении извести будет способствовать повышению подвижности частиц воды и ускорению протекания различных реакций, грунт дополнительно будет осушаться за счет повышения испарения влаги. Но повышение температуры в данном случае имеет недостаток, а именно: миграция влаги происходит в точку с более низкими температурами, это подтверждают исследования [22], следовательно, данный негативный фактор будет отрицательно влиять на процесс переноса воды из массива грунта к заполненным известью прорезям.

Также свободная и часть капиллярной воды будут мигрировать к прорезям с известью за счет разности гидравлических напоров. Так как вертикальные прорези работают по принципу дренажа, созданный гидростатический напор будет способствовать миграции воды в места введения негашёной извести.

Кроме процессов, вызванных устройством прорезей и введением извести, осушение массива грунта будет происходить и за счет процессов естественного просыхания грунта посредством солнечного теплового излучения и ветра.

Таким образом, грунт будет осушаться за счет реакции гашения извести, испарения, связанного с выделением тепла при реакции гашения и за счет естественного осушения. А

влагоперенос будет обеспечен за счет разности гидравлических напоров, сконцентрированного сухого места и отрицательно будет влиять на повышение температуры в месте гашения извести.

Часть влаги при внесении в грунт извести вступает в химическое взаимодействие с ее активными компонентами и переходит в твердое состояние. Количество этой влаги определяется по формуле:

$$W_{\text{хим}} = K_1 D, \quad (2)$$

где D – дозировка извести в грунте в процентах от массы сухого грунта, %;

K_1 – коэффициент, характеризующий активность извести по отношению к воде, для CaO .

Внесенная в грунт известь в виде сухого порошка увеличивает его сухую массу за счет добавления сухого материала и за счет массы, химически связанной окисью кальция воды. Влажность грунтоизвестковой смеси с учетом этого фактора определяется по формуле [23]:

$$W_{\text{смесь}} = \frac{W_0}{1 + 0,01 \cdot D \cdot (1 + K_1)}, \quad (3)$$

где W_0 – начальная фактическая влажность грунта, %.

В процессе гашения извести водой происходит экзотермическая реакция с выделением тепла, повышающего температуру грунта и ускоряющего испарение влаги. Определить расчётным путём дополнительное количество испарившейся влаги $\Delta W_{\text{исп.}}$ трудно из-за многофакторности задачи. Гораздо проще использовать экспериментальные данные и формулу:

$$\Delta W_{\text{исп.}} = k_i \cdot k_2 \cdot D, \quad (4)$$

где k_i – коэффициент, учитывающий дополнительные испарения влаги;

k_2 – коэффициент, учитывающий относительное содержание в извести свободной окиси кальция ($k_2 = 0,5 \dots 0,85$).

Таким образом, величина уменьшения влажности грунта с повышенной влажностью за счет испарения после внесения извести зависит от коэффициента испарения и дозировки извести в процентах от массы сухого грунта D и может быть определена по формуле

Таким образом для упрощения расчета по формуле (3) и (4):

$$W_{\text{смесь}} = \frac{W_0}{1 + 0,01 \cdot D \cdot (1 + K_1 + k_i \cdot k_2)}. \quad (5)$$

Для того чтобы найти изменение влажности воспользуемся формулой

$$\Delta W = W_0 - W_{\text{смесь}}. \quad (6)$$

Исходя из формул (5) и (6), выразим дозировку извести, необходимую для изменения влажности на ΔW :

$$D = \frac{100\% \cdot \Delta W}{(W_0 - \Delta W) \cdot (1 + K_1 + k_i \cdot k_2)}. \quad (7)$$

Для корректного использования данной формулы необходимо уточнить коэффициенты K_1 и k_p , для этого требуется экспериментальное исследование данного вопроса. Кроме того, необходимо учитывать, что при введении в глинистые грунты извести происходит изменение структуры грунта и его поведение при уплотнении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализировав полученные экспериментальные данные, можно сделать следующие выводы:

1. Осушение грунта повышенной влажности методом сосредоточенного введения негашеной извести возможно. Введение 2% извести по массе позволяет снизить влажность приблизительно на 4% за период от 6 до 13 сут в зависимости от начальной влажности грунта и коэффициента уплотнения грунта.

2. При перемешивании подготовленного по предлагаемой технологии грунта будет также проходить смешение гашеной извести и грунта, что будет способствовать повышению оптимальной влажности с 18,1% (для грунта без добавок) до 22,3% (для грунта с добавлением 4% извести) и его уплотняемости.

3. Помимо эффектов снижения влажности, при перемешивании извести с глинистым грунтом она будет способствовать протеканию пуццолановых реакций и образованию новой структуры укрепленного грунта, что дополнительно повысит прочность земляного полотна. Данный эффект планируется изучить в дальнейших исследованиях.

4. Необходимы дополнительные исследования предложенной методики с применением прорезей в грунте вместо скважин для ускорения осушения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. B. R. Phanikumar, K. Amrutha, "Effect of overburden pressure and degree of saturation on compressibility characteristics, *International Journal of Geomechanics and Geoengineering*, 2013 9(1): 52-62.

2. I. L. Sabri, "Study on the impact of moisture content on subgrade strength," in Proc. 5th International Symposium, Sri Lanka, 2015, pp. 71-76

3. Effect of Soaking Period of Clay on its California Bearing Ratio Value Proceedings of the 4th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'19) Rome, Italy – April, 2019 Paper No. ICGRE 162 DOI: 10.11159/icgre19.162)

4. F. L. D. Woollorton, Moisture Content and the CBR Method of Design, – C. 268 – 297.

5. Sina Kazemian, Bujang B.K. Huat. Assessment of Stabilization Methods for Soft Soils by Admixtures / International Conference on Science and Social Research – 2010. – C.123 – 126.

6. Ф. З. Нгуен. Исследование зависимости прочностных свойств грунта от его физического состояния / Magazine of Civil Engineering – 2012. – №9. – C.23–28.

7. A.R. Estabragh, M. Naseh, A.A. Javad. Improvement of clay soil by electro-osmosis technique / Electrochimica Acta – 2015. – №95. – C. 32–36.

8. S. JAYASEKERA. Electrokinetics to Modify Strength Characteristics of Soft Clayey Soils: A Laboratory Based Investigation / Applied Clay Science – 2014.

9. 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. – C. 130–136.

10. W.S. Abdullah, A.M. Al-Abadi. Cationic-electrokinetic improvement of an expansive soil / Applied Clay Science – 2010. – №47. – C. 343–350.

11. 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. – C. 1–8.

12. Little, D. N., Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime, Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa, 1995.

13. Lawrence W., Timothy Shevlin, Stave Tutokey, Joel Beeghly, The Effects of Various Lime Products for Soil Drying / Technical Report Carmeuse Lime Company – 2007. – C. 1-10.

14. Слободчикова Н. А. Научные основы подбора состава грунтов, укрепленных известью // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2017. № 4. С. 1–7.

15. Самедов А.М., Ткач Д.В. Укрепление переувлажненных глинистых грунтов молотой негашёной известью или жженой магнезией // Известия ТулГУ. Науки о земле. 2012. № 2. С. 162–170.

16. 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). – C. 159–162.

17. S. T. Noor, R. Uddin. Effect of Lime Stabilization on the Alteration of Engineering Properties of Cohesive Soil / Springer Nature Singapore Pte Ltd – 2019. – C. 1257–1267.

18. H. Ranaivomanana, A. Razakamanantsoa, O. Amiri. Permeability Prediction of Soils Including Degree of Compaction and Microstructure / *International Journal of Geomechanics* – 2017. – №17.

19. M. C. Wang, C. C. Huang. Soil Compaction and Permeability Prediction Models – 1984. – C. 1063–1083.

20. A. K. Singh, Ramvir Singh, Divyanshi Chaudhary. Heat conduction and moisture migration in unsaturated soils under temperature gradients / *Pramana*. – 1989. – C.587–594.

21. Jan, Mohammad Ashraf, Walker, Richard D. EFFECT OF LIME, MOISTURE AND COMPACTION ON A CLAY SOIL / *National Academy of Sciences* – 1963. – C.1–12.

22. A. Okeiyi, A.A. Amadi. Use of quick and hydrated lime in stabilization of lateritic soil: comparative analysis of laboratory data. / *International Journal of Geo-Engineering*. – 2017. – №8:3. C.1-13.

REFERENCES

1. B. R. Phanikumar, K. Amrutha, "Effect of overburden pressure and degree of saturation on compressibility characteristics," *International Journal of Geomechanics and Geoengineering*, 2013. 9(1): 52-62.

2. I. L. Sabri, "Study on the impact of moisture content on subgrade strength," in *Proc. 5th International Symposium, Sri Lanka*, 2015: 71-76

3. Effect of Soaking Period of Clay on its California Bearing Ratio Value Proceedings of the 4th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'19) Rome, Italy 2019 Paper ICGRE 162 DOI: 10.11159/icgre19.162)

4. F. L. D. Wooltorton, Moisture Content and the CBR Method of Design, pp. 268-297.

5. Sina Kazemian, Bujang B.K. Huat. Assessment of Stabilization Methods for Soft Soils by Admixtures / *International Conference on Science and Social Research*. 2010: 123 - 126.

F. Z. Nguyen. Issledovanie zavisimosti prochnostnyh svoystv grunta ot ego fizicheskogo sostojaniya [Investigation of the dependence of the strength properties of the soil on its physical condition] / *Magazine of Civil Engineering* 2012. 9:23-28. (in Russian)

6. A.R. Estabragh, M. Naseh, A.A. Javad. Improvement of clay soil by electro-osmosis technique / *Electrochimica Acta* 2015. 95: 32–36.

7. S. JAYASEKERA. Electrokinetics to Modify Strength Characteristics of Soft Clayey Soils: A Laboratory Based Investigation / *Applied Clay Science* 2014.

8. 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.

9. W.S. Abdullah, A.M. Al-Abadi. Cationic – electrokinetic improvement of an expansive soil / *Applied Clay Science* 2010.47: 343–350.

10. 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.

11. Little, D. N., Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime, Kendall / Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa, 1995.

12. Lawrence W., Timothy Shevlin, Stave Tutokey, Joel Beeghly, The Effects of Various Lime Products for Soil Drying / *Technical Report Carmeuse Lime Company* 2007: 1-10.

13. Slobodchikova N. A. Nauchnye osnovy podbora sostava gruntov, ukreplennyh izvest'ju [Scientific foundations for the selection of the composition of soils fortified with lime] / *Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia* 2017. 4: 1-7.

14. Samedov A.M. Ukreplenie pereuvlazhnykh glinistyh gruntov molotoj negashjonoj izvest'ju ili zhzhenoj magneziej [Strengthening waterlogged clayey soils with ground quicklime or burnt magnesia] // *Bulletin of TUSU. Geosciences*. 2012. 2: 162-170.

15. 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): 159-162.

16. S. T. Noor, R. Uddin. Effect of Lime Stabilization on the Alteration of Engineering Properties of Cohesive Soil / *Springer Nature Singapore Pte Ltd* 2019: 1257–1267.

17. H. Ranaivomanana, A. Razakamanantsoa, O. Amiri. Permeability Prediction of Soils Including Degree of Compaction and Microstructure / *International Journal of Geomechanics* – 2017: 17.

18. M. C. Wang, C. C. Huang. Soil Compaction and Permeability Prediction Models 1984: 1063–1083.

19. A. K. Singh, Ramvir Singh, Divyanshi Chaudhary. Heat conduction and moisture migration in unsaturated soils under temperature gradients / *Pramana*. 1989: 587-594.

20. Jan, Mohammad Ashraf, Walker, Richard D. EFFECT OF LIME, MOISTURE AND COMPACTION ON A CLAY SOIL / *National Academy of Sciences* 1963: 1-12.

21. A. Okeiyi, A.A. Amadi. Use of quick and hydrated lime in stabilization of lateritic soil: comparative analysis of laboratory data. / *International Journal of Geo-Engineering*. 2017. 8(3):1-13.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Алькаев Е.Н. Обоснование концепции исследования, планирование исследований, проведение сравнительного анализа, обобщение результатов исследования, формулировка выводов, работа с графическим материалом (65%).

Лунев А.А. Планирование исследований, обобщение результатов исследования, интерпретация результатов исследования, консультация по вопросам проведения испытаний, редактирование и переработка статьи (30%).

Голубенко В.В. Анализ и обобщение данных литературы, сбор и систематизация данных литературы; оформление статьи (5 %).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Evgeniy N. Alkaev justification of the research concept; research planning; comparative analysis; generalization of research results; statement of the conclusions; work with graphic material (65 %).

Alexander A. Lunev research planning; generalization of research results; interpretation of research results; consultation on testing issues; editing and revision of the article (30 %).

Vladimir V. Golubenko analysis and generalization of literature data, collection and systematization of literature data; article design (5 %).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алькаев Евгений Николаевич – аспирант кафедры «Проектирование дорог».

Лунёв Александр Александрович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Проектирование дорог».

Голубенко Владимир Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Проектирование дорог».

INFORMATION ABOUT THE AUTHERS

Evgeniy N. Alkaev – post-graduate student, the Road Design Department.

Alexander A. Lunev – Cand. Of Sci., Associate Professor of the Road Design Department.

Vladimir V. Golubenko – Cand. Of Sci., Associate Professor of the Road Design Department.