

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»  
Кафедра «Проектное управление и информационное моделирование в  
строительстве»

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)  
«РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ  
МЕЛИОРАЦИИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ С ПОВЫШЕННОЙ ВЛАЖНОСТЬЮ  
ДЛЯ СООРУЖЕНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА»

по направлению 08.06.01 «Техника и технологии строительства»

научная направленность: «Проектирование и строительство дорог,  
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей»

Аспирант



Алькаев Евгений Николаевич

Допустить к защите научного доклада:

Заведующий кафедры «ПУИМС»



к.т.н., доцент, Ю.В. Коденцева

Научный руководитель

Доцент кафедры «ПУИМС»



к.т.н., доцент, О.А. Рычкова

Нормоконтроль



В.А. Шнайдер

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы исследования**

Основой для строительства современной, высококачественной автомобильной дороги обладающей необходимой долговечностью в сложных природно-климатических и грунтово-геологических условиях России является высококачественное земляное полотно. От качества выполнения, которого зависит успешность всей дальнейшей эксплуатации автомобильной дороги.

В настоящее время в Российской Федерации все чаще возникают проблемы, связанные с изысканием пригодных грунтов для строительства насыпей земляного полотна. Высокая стоимость земель и сложность получения частных территорий под разработку карьеров вызывает ситуацию, когда под грунтовые резервы часто отводят неудобья и участки с переувлажненным некондиционными грунтами. Из-за этого подрядные организации вынуждены или повышать стоимость строительства за счет доставки пригодных материалов с отдаленных резервов или сооружать земляное полотно из грунта с влажностью значительно выше оптимальной при этом серьезно снижая качество сооружения. Зачастую такими грунтами являются глинистые грунты с повышенной влажностью.

Глинистые грунты повышенной влажности имеют ряд недостатков, а именно они не поддаются необходимому уплотнению механическими средствами, имеют повышенную липкость, недостаточную сопротивляемость деформированию и воздействиям погодно-климатических факторов, затрудняют проходимость дорожно-строительных машин и требуют улучшения физико-механических свойств.

Кроме того, в соответствии с изданным нормативным документом для проектирования нежестких дорожных одежд ПНСТ 542-2021 величина общего модуля упругости на поверхности рабочего слоя земляного полотна (при расчетной влажности грунта земляного полотна) в зависимости от ДКЗ должна быть не ниже следующих значений: 60 МПа - в ДКЗ I и II; 53 МПа – в ДКЗ III; 45 МПа – в ДКЗ IV, V. Для достижения данных значений модуля упругости рабочего слоя ПНСТ 542-2021 рекомендует применять методы технической мелиорации грунтов или применение дисперсных грунтов.

Свод правил 34.13330-2021 и ПНСТ 542-2021 определяет, что грунтовые строительные материалы могут быть использованы для возведения земляного полотна в естественном виде или после их технической мелиорации (улучшения строительных свойств). Однако, традиционные методы мелиорации в основном требуют предварительной разработки грунта в карьере 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. Кроме того, каждый из традиционных методов имеет и дополнительные недостатки ограничивающие данные методы в применении.

Таким образом разработка технологий комплексной технической мелиорации грунтов с повышенной влажностью для строительства земляного полотна является актуальной задачей, требующей решения.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросами изучения стабилизации и укрепления глинистых грунтов известью в России занимались Егоров И.В., Кнатько В.М., Левчановский Г.Н., Марков Л.А., Попандопуло Г.А., Филатова М.М., Безрук В.М., Веселов Б.В., Борисова Е.Г., Таскаев О.Г., Морозов С.А. и другие. За рубежом схожие исследования выполняли Little D. N., Bell F.G., Sven Hansbo, Boynton, R.S., Davidson, D.T., Demirel, T., Diamond, S., Dumbleton, M.J., Ross, N.F., McCallister, L.D., Petry, T.M., Stocker, P.T., M. Mavroulidou, Noor S. T., Uddin R. и другие. Не смотря на широкий круг специалистов исследовавших вопросы изучения стабилизации и укрепления глинистых грунтов известью, мало кто упоминает технологию производства работ и не изучено влияние метода сосредоточенного введения извести в глинистый грунт для осушения в карьере.

Установлено, что применение гашеной и негашеной извести для укрепления связных грунтов приводит к коренным преобразованиям их физико-механических свойств. Таким образом, вместо грунта, непригодного для строительства земляного полотна, получается укрепленный грунт, который имеет совершенно другие физико-механические показатели.

Обработка местного грунта негашеной известью широко распространена в ФРГ, Швейцарии, США, Бельгии, Индии. Так на примере возведении отдельных насыпей в ФРГ установлено, что обработка местного грунтов повышенной влажности негашеной известью обходится в 2,5 раза дешевле, чем замена его песком при дальности возки 30 км.

**Основная идея работы** состоит в том, что разработанная технология комплексной технической мелиорации глинистых грунтов повышенной влажности для сооружения земляного полотна подразумевает сосредоточенное воздействие извести, в качестве осушающей добавки, позволяет снизить влажность глинистого грунта в карьере, тем самым позволяет разрабатывать грунт оптимальной влажности. Кроме этого, на этапе разработки такого карьера известь перемешивается с грунтом в результате чего получается укрепленный грунт, имеющий повышенные физико-механические показатели.

**Объект исследования** – массив грунта повышенной влажности, осушаемый по технологии сосредоточенного внесения извести.

**Предмет исследования** – закономерности процессов происходящих в массиве грунта повышенной влажности при внесении извести сосредоточенным ме-

тодом и изменение физико-механических свойств этого грунта при разработке массива осушенного таким образом.

**Цель диссертационного исследования** – разработка технологии комплексной технической мелиорации глинистых грунтов повышенной влажности с использованием извести для сооружения земляного полотна.

Исходя из цели, сформулированы **задачи исследования**:

- изучить состояние вопроса и обосновать актуальность диссертационного исследования;
- теоретически обосновать эффективность использования извести и добавок для осушения и укрепления глинистых грунтов с повышенной влажностью;
- исследовать и предложить организационно-технологические параметры технической мелиорации грунтов с использованием извести;
- экспериментально обосновать рекомендуемые параметры технологических процессов при осушении и укреплении грунтов с использованием извести;
- осуществить опытно-производственную проверку предлагаемых конструктивно-технологических решений при сооружении земляного полотна.

**Научная новизна:**

- получены математические модели, достоверно отражающие процессы, происходящих в грунте при технической мелиорации глинистых грунтов повышенной влажности в ходе применения разработанной технологии;
- разработана новая технология комплексной технической мелиорации глинистых грунтов с повышенной влажностью для сооружения земляного полотна.
- получены расчетные параметры для проектирования земляного полотна с использованием укрепленных глинистых грунтов по данной технологии.
- впервые обосновано рациональное расстояние между прорезями при сосредоточенном внесении извести и т.д.

**Теоретическая значимость** диссертационной работы заключается в получении математических моделей для описания процессов в грунтово-известковых композициях и позволяющих определить расчетные параметры материала в зависимости от рецептуры, технологии смешения и внешних условий.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в разработке новой технологии комплексной технической мелиорации глинистых грунтов с повышенной влажностью для сооружения земляного полотна и расчета значений параметров, необходимых для проектирования слоев по данной технологии.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой для решения поставленных задач является системный подход при разработке технологии комплексной технической мелиорации грунтов с повышенной влажностью.

В процессе выполнения диссертационной работы использованы методы исследования, включающие: литературный и патентный поиск, анализ и обобщение, теоретические исследования и физические эксперименты, теорию планирования эксперимента, опытное строительство и обследование, технико-экономическую оценку результатов исследования.

**Достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается методологической базой исследований, основанной на фундаментальных теоретических положениях; соблюдением основных принципов физического и математического моделирования; достаточным объемом экспериментальных данных, полученных с использованием приборов и оборудования, прошедших поверку. Результаты исследования докладывались и получили положительные отзывы на 2 научных конференциях различного уровня.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель процесса осушения глинистого грунта по средствам негашёной извести в рамках предложенной технологии сосредоточенного воздействия извести для технической мелиорации глинистых грунтов;

2. Математические зависимости характеристик прочности и деформируемости глинистых грунтов, обработанных известью;

3. Результаты экспериментальных исследований закономерностей изменения характеристик прочности и деформируемости глинистых грунтов, обработанных известью;

4. Технология комплексной технической мелиорации глинистых грунтов с повышенной влажностью для сооружения земляного полотна;

5. Параметры для проектирования слоев дорожной одежды при технической мелиорации по разработанной технологии;

**Личный вклад автора.** Автором лично проведен анализ существующих способов технической мелиорации грунтов с повышенной влажности. На основе проведенного анализа разработан метод технической мелиорации учитывающий недостатки существующих методов. Проведены исследования, подтверждающие преимущества предложенной методики в сравнении с существующими аналогами. Получены зависимости позволяющие прогнозировать осушение грунта по средствам введения извести, а так же проведены исследования по изучению изменения физико-механических свойств глинистых грунтов укрепленных известью и добавками. Проведена опытно-производственная проверка технологии комплексной технической мелиорации грунтов при сосредоточенном введении извести.

**Апробация работы.** Материалы исследования доложены, обсуждены и получили положительные отзывы на следующих конференциях и семинарах:

- 1) III Международная научно-практическая конференция «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации» 29 - 30 ноября 2018 г. – Омск, СибАДИ.
- 2) IV Международная научно-практическая конференция «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации» 28 - 29 ноября 2019 г. – Омск, СибАДИ.

**Публикации.** На основании результатов исследований было опубликовано 6 работ (из которых 1 в научных журналах принадлежащих перечню ВАК), имеется патент на полезную модель.

### **Содержание работы**

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень ее разработанности, определяются цели и задачи, осуществляется выбор предмета и объекта исследования. Формулируются положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** произведен обзор существующих методов технической мелиорации грунтов с повышенной влажностью.

Рассмотрены три группы методов улучшения строительных свойств грунтов с повышенной влажностью: механические, физические и химические. Описаны их особенности производства работ и недостатки.

Предлагаемый нами метод сосредоточенного воздействия осушающего агента главным образом направлен на осушение грунта в карьере. Сосредоточенное воздействие подразумевает 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.

Эффект осушения достигается за счет того, что происходит гашение извести водой, содержащейся в массиве грунта. В результате гашения происходит образование гидроксида кальция, который является медленноотвердеющим вяжущим материалом, в результате способствующий протеканию 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 и пучения, увеличению сопротивляемости циклам высушивания/увлажнения и несущей способности.

Трудами советских и иностранных исследователей, таких как Егоров И.В., Левчановский Г.Н., Марков Л.А., Попандопуло Г.А., Филатова М.М., Безрук В.М., Макдуэлл Ч. и других, установлено, что применение гашеной и негашеной извести для укрепления связных грунтов приводит к коренным преобразованиям их физико-механических свойств. Таким образом, вместо грунта, непригодного для строительства земляного плотна, получается укрепленный грунт, который имеет совершенно другие физико-механические показатели.

Обработка местного грунта негашеной известью широко распространена в ФРГ, Швейцарии, США, Бельгии, Индии. Так на примере возведения отдельных насыпей в ФРГ установлено, что обработка местного грунтов повышенной влажности негашеной известью обходится в 2,5 раза дешевле, чем замена его песком при дальности возки 30 км.

**Во второй главе** представлено теоретическое обоснование параметров комплексной технологии технической мелиорации грунтов с использованием извести.

При укреплении глинистых грунтов известью происходят следующие взаимосвязанные процессы. Двухвалентные ионы кальция, являясь сильным коагулятором, вызывают коагуляцию глинистых и коллоидных частиц грунта, а также способствуют упрочнению микроагрегатной структуры тонкодисперсной части грунта.

Так же стоит отметить что многие исследования показывают, что введение извести в глинистые грунты способствует изменению его структуры, что 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. Для этого были проведены испытания по определению максимальной плотности сухого грунта и оптимальной влажности. Наши исследования подтверждают эту закономерность и оптимальная влажность изменилась 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 г/см<sup>3</sup> (для грунта без добавок) до 1,58 г/см<sup>3</sup> (для грунта с добавлением 4% извести).

Снижение влажности при введении извести в грунт повышенной влажности происходит в результате воздействия нескольких факторов:

- реакция гидротации оксидов, содержащихся в негашеной извести;
- испарение воды за счет экзотермических реакций;
- внесенная в грунт известь увеличивает его сухую массу;
- изменение структуры грунта в результате пуцолановых реакции между глинистым грунтом и гашеной известью.

Были получены формулы для расчета дозировки извести, необходимую для изменения влажности на  $\Delta W$ :

$$D = \frac{\Delta W}{(W_{\phi} - \Delta W) \cdot 0,01 \cdot (1 + K_1) + K_1 + k_i \cdot K_2}, \quad (1)$$

где  $K_1$  – коэффициент, характеризующий активность вяжущего по отношению к воде;

$D$  – дозировка извести в процентах от массы его твердой фазы, %.

$k_i$  – коэффициент, учитывающий дополнительные испарения влаги ( $k_i \approx 0,23$  при 10 % влажности, на каждые 10 % увеличения влажности его значение уменьшают на 0,06);

$K_2$  – коэффициент учитывающий относительное содержание в извести свободной окиси кальция.

$\Delta W$  – требуемая величина изменение влажность грунта после взаимодействия с известью, %;

$W_{\phi}$  – начальная фактическая влажность грунта, %.

Исследовалась скорость фильтрации и перераспределения влаги при осушении массива глинистых грунтов природного сложения.

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

Для определения скорости фильтрации используем формулу для расчета объема притока безнапорных вод к траншее несовершенного типа с двух сторон, однако в отличии от решения для траншеи не требуется устройство водоотвода и продольного уклона, так как вода будет связываться при реакции с известью:

$$Q = L \cdot k_{\phi} \cdot \frac{H_0^2 - h_0^2}{R}, \quad (2)$$

где  $h_0$  – глубина воды в траншее, отсчитываемая от подошвы активной зоны, м;

$L$  – длина траншеи (канавы), м;

$k_{\phi}$  – коэффициент фильтрации, м/сут;

$R$  – радиус действия дренажа (траншеи), м;

$H_0$  – глубина активной зоны, м.

Для определения коэффициента фильтрации в поперечном направлении были отобраны образцы не нарушенного сложения. Испытания проводились с применением компрессионно-фильтрационного прибора в соответствии с методикой описанной в ГОСТ 25584-2016. Так же проводились испытания на образцах нарушенного сложения. Коэффициента фильтрации для грунтов естественного составил 0,008 м/сут, для грунт нарушенного сложения коэффициент фильтрации составил 0,007 м/сут.

По результатам второй главы можно сделать вывод, что грунт будет осушаться, при применении метода сосредоточенного введения извести, за счет реакции гидротации оксидов, испарения, связанное с выделением тепла при реакции гашения. Так же стоит учитывать изменение структуры материала и изменение его границ допустимой влажности. А влагоперенос будет обеспечен за счет разности гидравлических напоров, сконцентрированного сухого места за счет гашения извести.

**В третьей главе** представлено экспериментальное обоснование эффективных параметров технологических процессов при осушении и укреплении грунтов с использованием извести. Рассмотрена экспериментальная проверка величины и интенсивности поглощения влаги известью из глинистых грунтов природного сложения.

Свойства грунта приведены в табл. 1. После отбора проб грунт высушивался до постоянной массы и измельчался на грунтовой мельнице МГ-1Ф до размеров гранул менее 1 мм.

Таблица 1 – Физико-механические свойства грунта

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/см <sup>3</sup>
6. Плотность частиц грунта	2,60	г/см <sup>3</sup>
6. Содержание песчаных частиц (2-0,05мм)	4,1	%
7. Ph водной вытяжки	9,15	
8. Емкость катионного обмена	7,8	Г <sub>экв</sub> /100гр
9. Потери при прокаливании	3,54	%

В целях изучения динамики осушения грунта был изготовлен лоток. 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, в вследствие переувлажнения, любые попытки механического воздействия не позволяли добиться даже минимального коэффициента уплотнения  $K_u=0,90$  (происходило выдавливание грунта из под трамбующих устройств). Динамика осушения показана на рисунке 1.

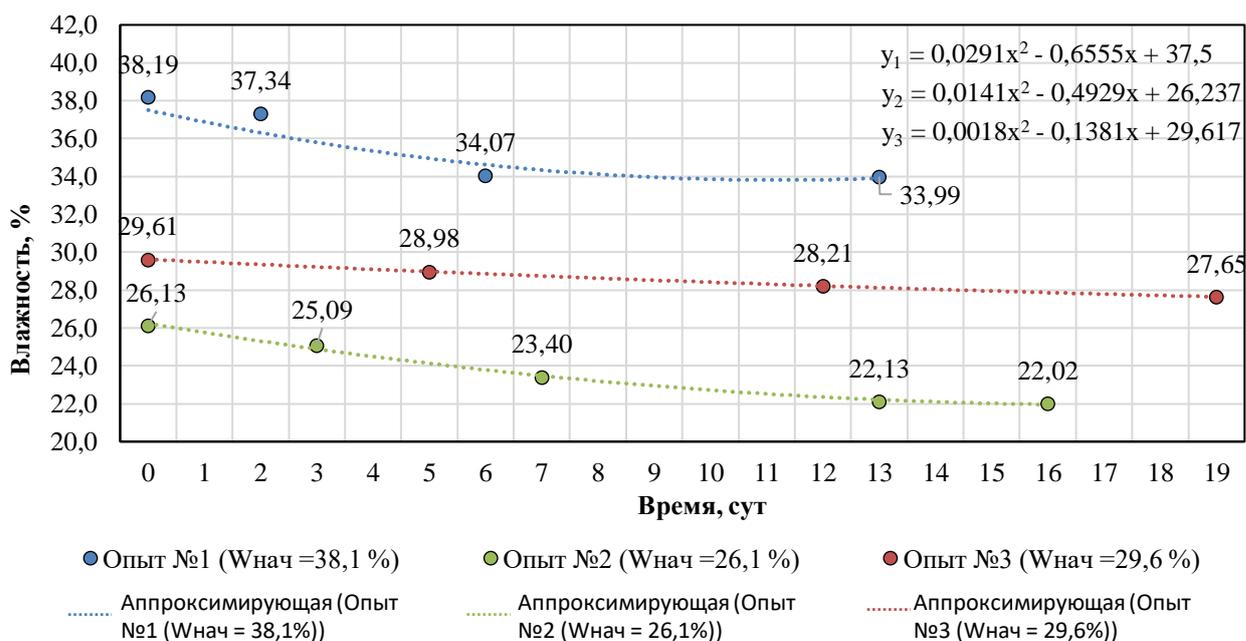


Рисунок 1 – Динамика осушения массива суглинка в ходе экспериментальных исследований при введении извести по средствам скважины

Динамика осушения, во всех опытах дает возможность понять что одинаковое (1 % от массы грунта) количество извести снижает влажность приблизительно на 4%, при этом в зависимости от влажности и плотности меняются сроки в течении которых происходит осушение (в процессе гидратации извести). Так же на скорость осушения грунта вероятно оказывает влияние коэффициент уплотнения грунта.

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

Проанализировав результаты осушения можно сделать вывод что устройсто вертикальных скважин не позволяет рационально разместить достаточное количество извести, кроме этого осушение грунта происходит не достаточно

Далее исследуем интенсивность осушения при введении извести по средствам вертикальных прорезей. Аналогично первым трем опытам грунт в лоток загружался послойно с различной начальной влажностью (Опыт №4 – 24,81%, Опыт №5 – 23,77%, Опыт №6 – 22,26%) и уплотнялся до плотности в естественном залегании. Для консолидации грунт выдерживался в течении суток под полиэтиленовой пленкой. Далее в грунт вводилась известь в различном количестве (Опыт №4 – 2%, Опыт №5 – 4%, Опыт №6 – 6%) от массы сухого материала. Во время проведения эксперимента лоток накрывался пленкой и закрывался крышкой.

Влажность контролировалась, в различных точках и на различной глубине, методом высушивания до постоянной массы и с помощью влагомера. Результаты представлены на рисунке 2.

Для предотвращения осушения грунта за счет естественных процессов, грунт укладывался в водонепроницаемый лоток из оргстекла. Таким образом в отличие от первых трех опытов, грунт осушался только по средствам введения извести.

Стоит отметить что известь уже через сутки после введения в грунт увеличивалась в объемах, следовательно происходила реакции гашения извести. Таким образом подтверждается теория о продольной фильтрации воды в грунте.

В ходе опыта на 1, 3, 7, 11 и 15 сутки отбирались пробы для определения влажности. Динамика осушения показана на рисунке 2.

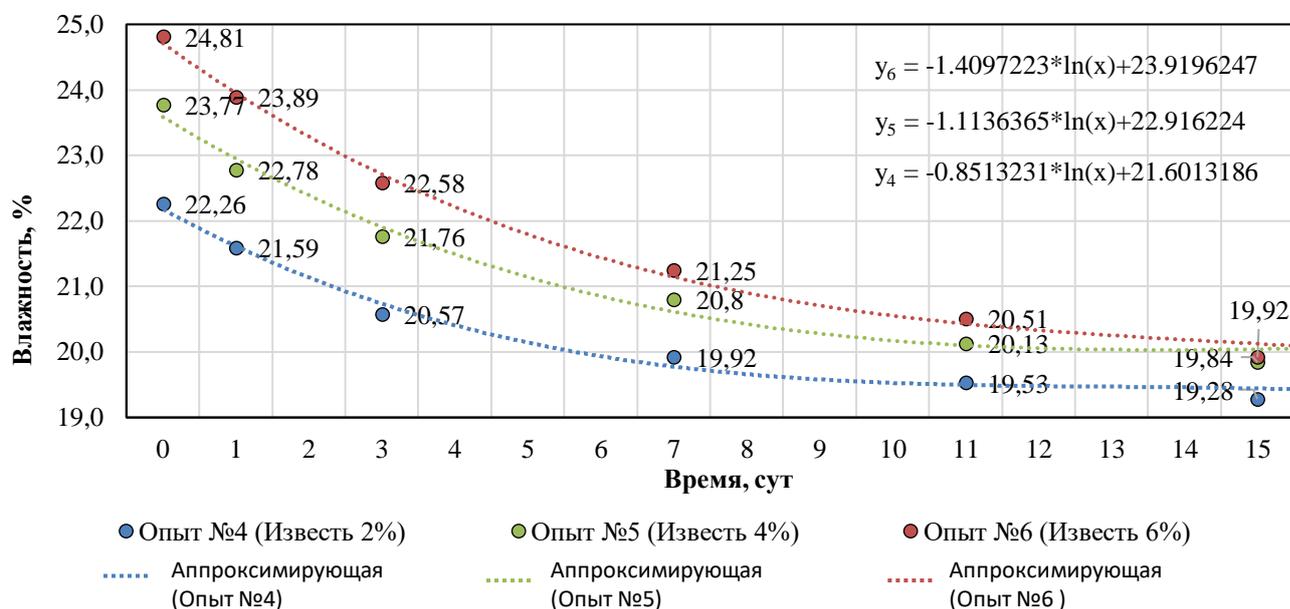


Рисунок 2 – Динамика осушения массива суглинка в ходе экспериментальных исследований при введении извести по средствам прорези

По графику видно что интенсивное изменение влажности происходило в течении 7 суток (2,34-3,56%), а за 15 суток влажность уменьшилась на 2,98-4,89%. После чего влажность в лотке стабилизировалась.

Проанализировав результаты осушения можно сделать вывод о возможности осушения грунта методом сосредоточенного воздействия извести и получим математическую модель, позволяющую прогнозировать процесс осушения в зависимости от количества извести и начальной влажности. Граничными условиями для применения данной зависимости является период осушения с 1 до 18 суток. Формула для расчет влажности  $W_t$  через некоторое время  $t$  момента введения извести:

$$W_t = -(0,1396 * D + 0,5665) * Ln(t) + \frac{0,7148}{D} - 1,0193 + W_{нач}, \quad (3)$$

где  $W_{нач}$  – начальная влажность грунта, %;

$D$  – дозировка извести, %.

Дополнительно было изучено изменения физико-механических свойств при химических добавок.

Для изготовления образцов грунт перемешивался с гашеной известью количестве 2, 4 и 6% по массе сухого грунта и водой (в количестве, необходимом для достижения оптимальной влажности).

Изучение комбинации извести и добавок ускорителей. По методике, аналогичной описанной выше, испытывались образцы с добавлением  $CaCl_2$ ,  $FeSO_4$ ,  $NaOH$ ,  $FeCl_3$  и  $Na_2SO_4$  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 после разработки потребовал проведения дополнительного исследования влияния времени хранения смеси на кинетику твердения грунтов, укрепленных гашеной известью. Для этого готовая перемешанная смесь грунта и извести хранилась в герметичном контейнере, для предотвращения потерь влаги, в течение 1, 3 и 10 суток. После чего были изготовлены по 6 образцов для каждой смеси. Образцы после приготовления хранились в условия нормального твердения 28 и 90 суток.

Результаты испытаний по определению предела прочности на сжатие грунта после обработки известью представлены на рис. 3.

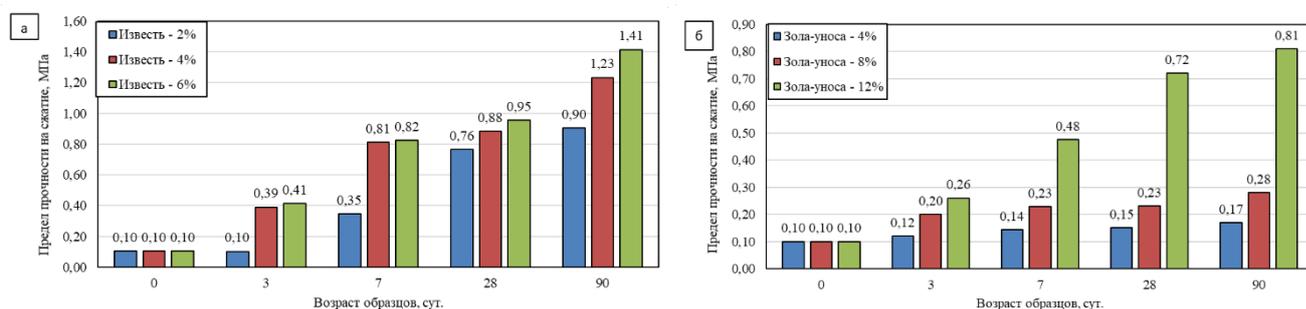


Рис. 3. Результаты определения предела прочности на сжатие суглинка легкого пылеватого при разном содержании вяжущего (а - извести; б – золы-уноса) в различном возрасте

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что введение извести увеличивает предел прочности на сжатие материала до значений 0,9-1,4 МПа. В возрасте 28 суток образцы продолжают набирать прочность, это подтверждает, что известь является медленно твердеющим вяжущим, и требуется дополнитель-

ное 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 суток твердения.

Введение золы-уноса увеличивает предел прочности на сжатие грунта меньше, чем известь (в 1,7-3,5 раза, если делать выводы по образцам в возрасте 90 суток). Введение 4% и 8% золы-уноса дает незначительный положительный эффект на повышение 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 представлены на рис. 4.

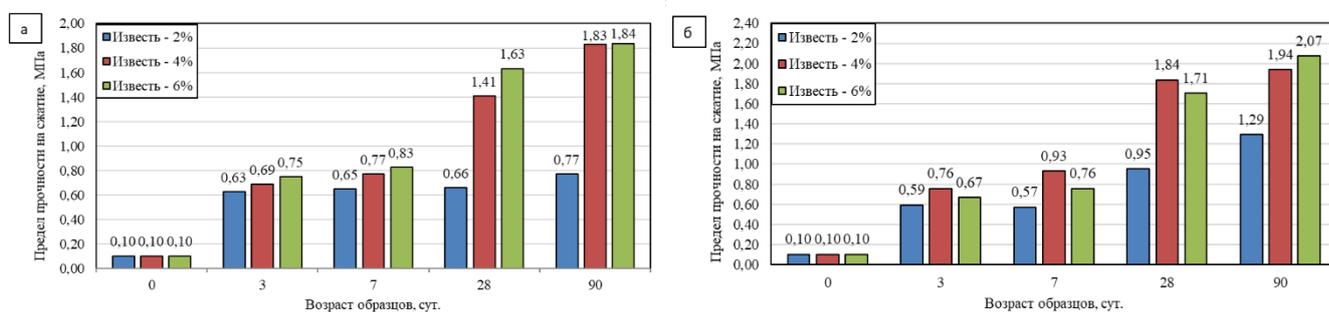


Рис. 4. Результаты определения предела прочности на сжатие суглинка легкого пылеватого при разном содержании гидратированной извести и добавлении хлористого кальция (а – содержание хлористого кальция 0,5%; б – содержание хлористого кальция 1,0%) в различном возрасте

По графикам видно, что добавление хлорида кальция способствует ускорению набора прочности, причем добавка CaCl<sub>2</sub> 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 суток. Данный эффект может быть вызван ускорением схватывания на начальных этапах твердения, после чего часть связей была разрушена в процессе перемешивания и уплотнения.

Результаты опытов с добавлением FeSO<sub>4</sub>, NaOH, FeCl<sub>3</sub> и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> при укреплении грунтов различным содержанием извести в различном возрасте образцов представлен на рис. 5 и 6.

Исходя из полученных данных видно, что добавление FeSO<sub>4</sub> негативно влияет на процесс набора прочности образцов грунта, укрепленных известью. Учитывая, что в процессе хранения образцов на них отмечались локальные разрушения, вызванные увеличением объема образцов, можно сделать вывод, что сульфат ионы способствуют образованию минерала этtringита (гидросульфоалюминат кальция).

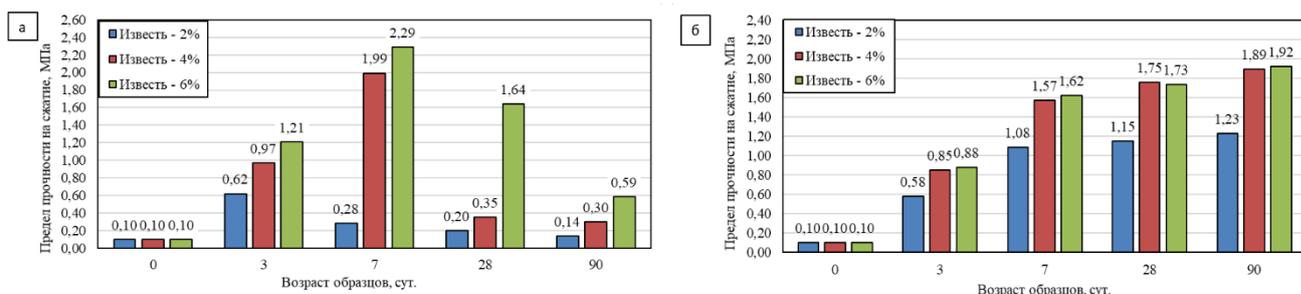


Рис. 5. Результаты определения предела прочности на сжатие суглинка легкого пылеватого при разном содержании гидратированной извести и 0,5% добавок (а - сернистого железа; б - гидроксида натрия) в различном возрасте

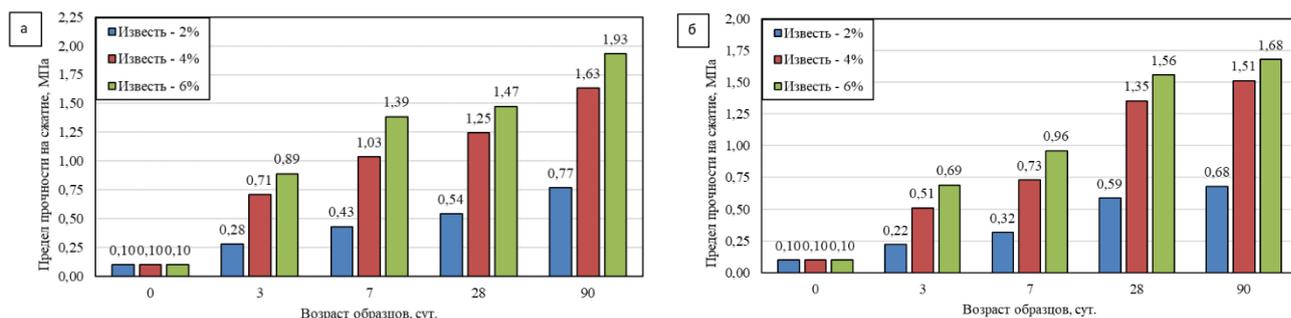


Рис. 6. Результаты определения предела прочности на сжатие суглинка легкого пылеватого при разном содержании гидратированной извести и 0,5% добавок (а - хлорида железа; б - сульфата натрия) в различном возрасте

В отличие от FeSO<sub>4</sub>, внесенного с осушающим агентом (известью), добавление NaOH, FeCl<sub>3</sub> и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> дает положительные результаты в отношении кинетики набора прочности образцов. По результатам испытаний видно, что процесс набора прочности практически закончился на седьмые сутки для NaOH и на двадцать восьмые для FeCl<sub>3</sub> и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Так как наибольший эффект от введения добавок наблюдается от NaOH, применим эту добавку для дальнейших исследований по изучению их влияния на прочность растяжения при расколе, водо- и морозостойкость изучаемых материалов. При определении морозостойкости число циклов замораживания/оттаивания принимаем в соответствии с ГОСТ Р 70452-2022. Для применения данного материала в рабочем слое циклов принимаем равным 10. По завершению 10 циклов замораживания/оттаивания определяем предельную прочность на сжатие.

Результаты по определению водостойкости и морозостойкости сведены в таблицу 2 и 3 соответственно.

Таблица 2 – Результаты по определению коэффициента водостойкости

Возраст образцов, сут	Известь - 2%	Известь - 4%	Известь - 4% + NaOH	Известь - 6%
7	0,98	0,91	0,92	0,93
28	0,98	0,85	0,85	0,80
90	0,92	0,79	0,78	0,73

Таблица 3 – Результаты по определению коэффициента морозостойкости

Возраст образцов, сут	Известь - 2%	Известь - 4%	Известь - 4% + NaOH	Известь - 6%
7	0,54	0,62	0,61	0,62
28	0,58	0,69	0,76	0,71
90	0,61	0,73	0,81	0,74

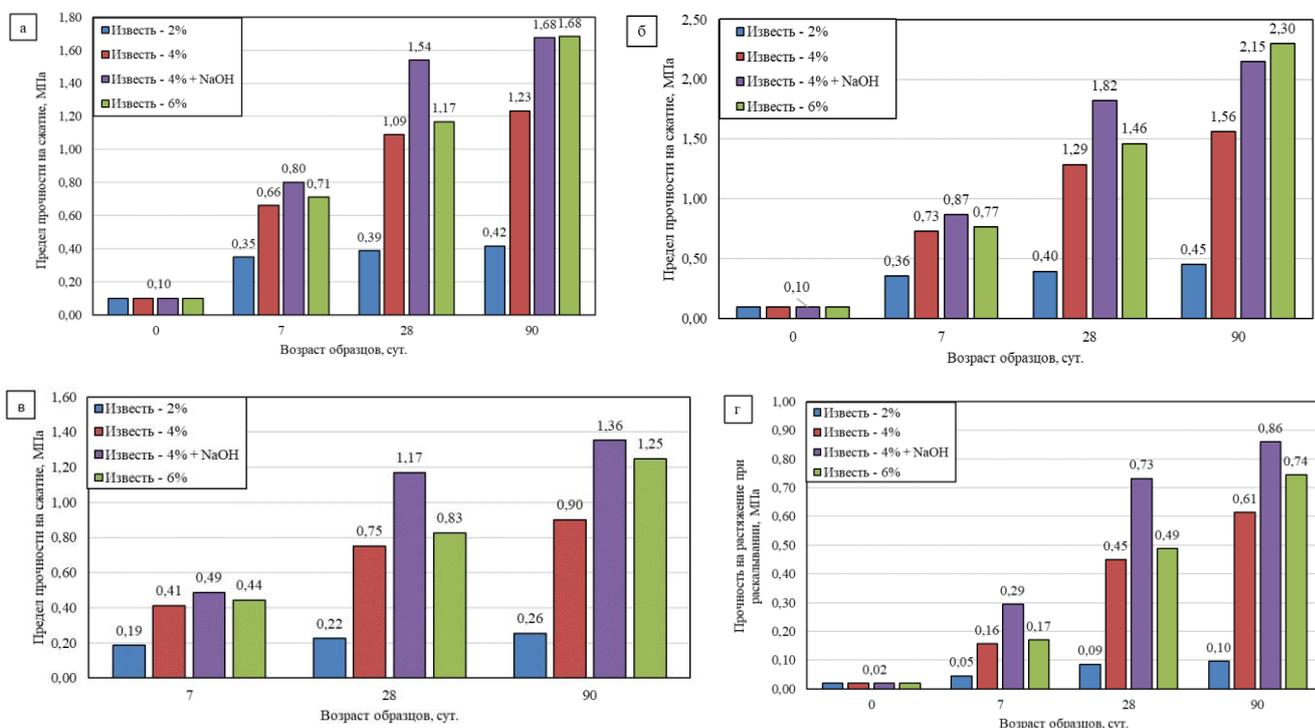


Рис. 7. Результаты определения предела прочности на сжатие суглинка легкого пылеватого при разном содержании гидратированной извести и 0,5% добавки гидроксида натрия (а – в водонасыщенном состоянии; б – в сухом состоянии; в – после 10 циклов замораживания/оттаивания; г – прочность на растяжение при раскалывании) в различном возрасте

По результатам представленным на рисунке 7 и ГОСТ Р 70452-2022 грунт по пределу прочности при сжатии при добавлении 4% и 6% извести можно отнести к укрепленным грунта соответствующий М10А. При этом предел растяжения при раскалывании имеет запас порядка 400%. Результаты по определению морозостойкости говорят о том что грунт можно классифицировать как укрепленный только при применении добавок, так как коэффициент должен быть более 0,80.

Так же стоит отметить что при добавлении 2% извести, грунт следует отнести к стабилизированным грунтам. Таким образом для данного количества извести необходимы дополнительные исследования по определению значений индекса непосредственной несущей способности, значения калифорнийского числа, значения линейного набухания и показателя пучинистости.

В начале индекс непосредственной несущей способности (IP), значение калифорнийского числа (CBR) и линейное набухание для обычного грунта без ста-

билизации. Испытания выполняются в соответствии с ГОСТ Р 70457-2022. Результаты сведем в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты по определению IPI и CBR

Испытание	p <sub>1</sub> (2,5мм), кН	p <sub>2</sub> (5 мм) , кН	Результаты для 2,5 мм, %	Результаты для 5,0 мм, %	Принимаем, %
IPI	1,4	2,1	10,606	10,5	11,36
	1,5	2,2	11,364	11	
	1,6	2,1	12,121	10,5	
CBR	0,53	0,68	4,015	3,4	3,91
	0,5	0,67	3,788	3,35	
	0,52	0,7	3,939	3,5	

Так как CBR отличается от IPI более чем на 25%, это говорит о не достаточной водоустойчивости грунта. Таким образом данный грунт необходимо стабилизировать или укреплять. Линейное набухание будет составлять 5,33%.

Аналогично определим IPI, CBR и линейное набухание для стабилизированного грунта. Для этого грунт перемешивается с известью в количестве 2%. Результаты сведем в таблицу 5.

Таблица 5 – Результаты по определению IPI и CBR

Испытание	p <sub>1</sub> (2,5мм), кН	p <sub>2</sub> (5 мм) , кН	Результаты для 2,5 мм, %	Результаты для 5,0 мм, %	Принимаем, %
IPI	5,4	7,8	40,9	39	41,41
	5,5	7,7	41,7	38,5	
	5,5	7,6	41,7	38	
CBR	4,3	5,7	32,6	28,5	33,08
	4,4	5,6	33,3	28	
	4,4	5,8	33,3	29	

Таким образом стабилизированный грунт можно классифицировать к категории IPI<sub>40</sub> и CBR<sub>30</sub>. Линейное набухание равно 0,67%.

В соответствии с ГОСТ 28622-2012 определим степень пучинистости грунта. По завершению двух циклов замораживания/оттаивания определяем вертикальную деформацию образца. Результаты сведены в таблицу 6.

По результатам грунт без укрепления классифицируется как чрезмернопучинистый и применять данный грунт без специальных методов технической мелиорации не допускается. При введении в грунт 2% извести структура грунта изменяется и по результатам испытаний его можно классифицировать как непучинистый.

Таблица 6 – Результаты определения относительной деформации морозного пучения

Наименование материала	Фактическая толщина слоя промерзшего слоя грунта, мм	Вертикальная деформация образца в конце испытания, мм	Относительная деформация морозного пучения
Суглинок легкий	11,2	1,19	0,106
	10,4	1,27	0,122
	10,7	1,22	0,114
Суглинок легкий + 2% гашеная известь	10,5	0,087	0,008
	10,8	0,101	0,009
	10,9	0,102	0,009

Так как производственные процессы строительства насыпи весьма не предсказуемы так как зависят от множества факторов, в процессе строительства могут возникать перерывы в строительстве. Данный фактор негативно влияет на итоговую смесь, так как будет требовать хранения смеси в штабелях или на месте производства работ в течении некоторого количества времени. Таким образом необходимо исследования влияние перерыва между смешением и уплотнением смеси.

Результаты опытов по оценке снижения прочности укрепленного грунта в зависимости от времени между увлажнением извести и его уплотнения в различном возрасте образцов представлены на рис. 8.

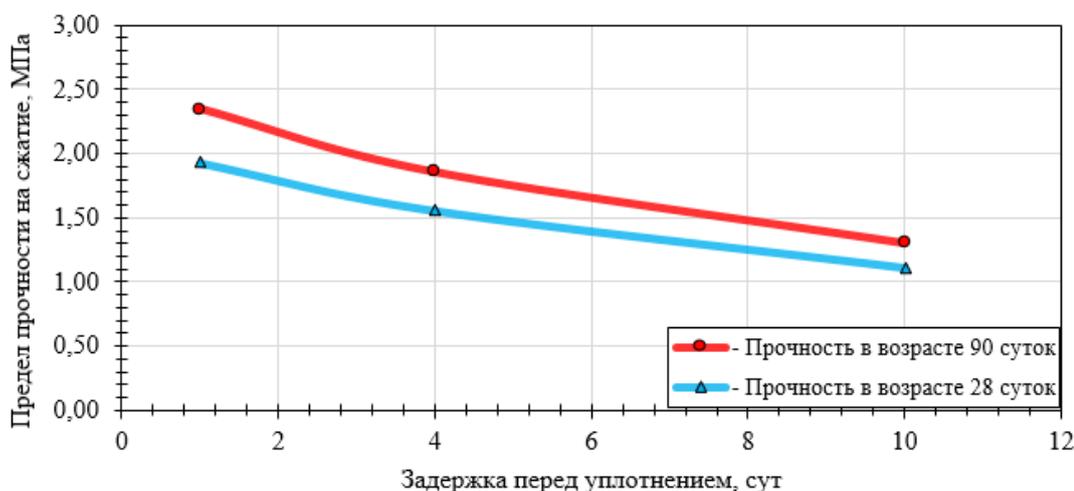


Рис. 8. Изменение прочности на сжатие при различном времени при уплотнении

В ходе анализа полученных данных (рис. 6) была получена зависимость, которая позволяет прогнозировать предел прочности на сжатие при определенных начальных условиях. Эмпирические соотношения, связывающие эти величины, представлены в виде формулы:

$$R_t = R \cdot (1 - 0,18 \cdot \ln(t)) \quad (4)$$

где  $R_t$  – предел прочности на сжатие образца материала при формовке после выдержки в течение  $t$  суток, МПа;

$R$  – предел прочности на сжатие образца материала при формовке непосредственно после увлажнения, МПа.

$t$  – количество суток, прошедших с момента увлажнения извести.

Исходя из данных, отображенных на рис. 6. можно 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 четвертой главе** рассматривается опытно-производственная проверка технологии комплексной технической мелиорации грунтов при сосредоточенном введении извести.

Основным деформационным параметром механических свойств дорожно-строительных материалов является модуль упругости. Среди всех методов определения модуля упругости конструктивных слоёв в дорожной отрасли наибольшее распространение получил метод штамповых испытаний.

Для изучения модуля упругости укрепленного грунта известью был построен опытный участок внутри лотка с покрытием из этого материала.

Для определения модуля упругости укрепленного грунта известью опытного участка оценивался по методике ОДМ 218.5.007-2016 три раза. Первый цикл выполнялся для определения модуля упругости конструкции без покрытия из исследуемого материала, а второй и третий после его укладки и в проектном возрасте 90 суток. Такой подход позволил, используя математический аппарат теории упругости, вычислить модуль упругости укрепленного грунта из полученных экспериментальных данных.

Лоток был разделен на 3 участка. Перемешивание грунта, оптимальной влажности, и извести на первом и втором участке велось вручную до однородного распределения вяжущего по объему грунта. Использовались различные методы перемешивания (лопатами и мотокультиватором). На третьем участке для сравнительного анализа устраивался слой грунта без применения добавок. Далее грунт уплотнялся ручной трамбовкой до достижения максимального коэффициента уплотнения.

Используя численные итерационные методы для каждого участка был вычислен модуль упругости материала. Все результаты приведены в таблице 7.

По результатам таблицы 7 можно сделать вывод что избыточно увлажнение снижает прочность смеси практически в 2 раза, кроме того технология перемешивания так же влияет на конечный модуль упругости слоя. Зная модуль упругости слоя и предел прочности на сжатие образцов рассчитаем модуль упругости для остальных смесей. Результаты сведем в таблицу 8.

Таблица 7 – Модули упругости материалов слоев по участкам

Номер точки	Место	Толщина слоя, м	Модуль упругости слоя, МПа	Примечания
Естественная влажность				
1	лево	0,31	111	Грунт + Известь 4% (Перемешивание лопатами)
2	середина	0,32	158	Грунт + Известь 4% (Перемешивание мотокультиватором)
3	право	0,28	32	Грунт
Избыточное увлажнение				
1	лево	0,31	75	Грунт + Известь 4% (Перемешивание лопатами)
2	середина	0,32	85	Грунт + Известь 4% (Перемешивание мотокультиватором)
3	право	0,28	14	Грунт

Таблица 8 – Результаты расчета модуля упругости материала

Срок набора прочности, сут	Модуль упругости слоя в зависимости от содержания извести		
	Известь - 2%	Известь - 4%	Известь - 6%
7	45	85	91
28	50	140	150
90	53	158	215

По полученным данным выведем математическую модель для расчета модуля упругости материала в определенном возрасте в зависимости от различного содержания извести:

$$E = \left( -\frac{104,146}{D} + 57,087 \right) * \ln(t) + \frac{16,27}{D - 7,32} + 36,418, \quad (5)$$

Так же в четвертой главе описаны особенности технологии комплексной технической мелиорации грунтов при сосредоточенном введении извести.

Данный метод необходимо применять только в сочетании с водоотведением и ликвидацией источника избыточного увлажнения грунтов. Так же рекомендуется использовать грунтосмесительные машины или установки для получения более однородной смеси, а следовательно более высоких прочностных показателей готового слоя.

Технологическая схема осушения грунта с повышенной влажностью методом сосредоточенного воздействия негашеной известью представлена на рисунке 9.

На практике разработка карьера для строительства земляного полотна возможно в следующей технологической последовательности:

- планировка поверхности карьера с приданием уклона равного 0,05 для обеспечения водоотвода;
- устройство прорезей с помощью траншеекопателя;
- параллельно устройству прорезей осуществляется подвоз и распределение негашеной извести вручную с предварительным уплотнением;
- при прогнозировании обильных осадков необходимо перекрытие извести оставшимся от разработки грунтом, для предотвращения увлажнения извести осадками; технологический перерыв необходимый для осушения грунта;
- разработка грунта, на глубину устройства прорезей, экскаватором (стоянка сверху) с предварительным перемешиванием и погрузка его в автосамосвалы;
- транспортировка смеси, разравнивание, уплотнение и уход производятся в зависимости от принятого звена техники;
- разработка последующих слоев выемки происходит по тем же принципам и с использованием той же технологической последовательности что и при разработке первого слоя.

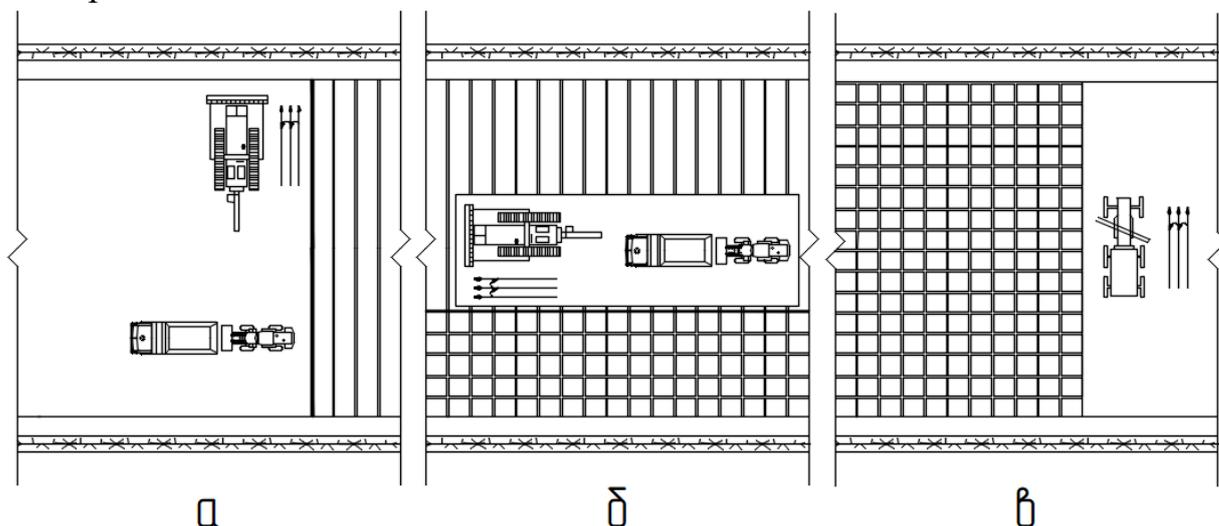


Рис. 9. Технологическая схема устройства прорезей на участке с грунтами повышенной влажности: а – устройство поперечных прорезей и засыпка их негашёной известью; б – устройство продольных прорезей и засыпка их негашёной известью; в – при необходимости планировка верха разрабатываемого участка.

Для определения рациональных геометрических параметров при сосредоточенном введении извести в грунтовый массив рассмотрим схему прорезей, заполненных негашёной известью, на примере карьера с грунтами повышенной влажности представлена на рисунке 10.

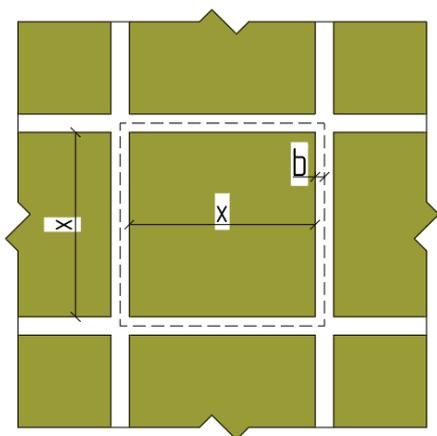


Рис. 10. Схема прорезей, заполненных негашёной известью

Ширину и глубину прорезей принимаем в зависимости от возможности используемой техники. Для расчетов примем машину баровуюгрунторезную БР-01. Максимальная глубина копания траншеи данной машины составляет 2,0 м, а ширина устраиваемой прорези 0,14 м. Таким образом,  $a = 1,5$  м,  $b = 0,07$  м. В результате математических преобразований получим формулу для расчета расстояний между прорезями:

$$x = \frac{b(\rho_{\text{изв.}} + \sqrt{\rho_{\text{изв.}}^2 + 4 \cdot D \cdot \rho_{\text{ск.гр.}} \cdot \rho_{\text{изв.}}})}{2 \cdot D \cdot \rho_{\text{ск.гр.}}}, \quad (6)$$

где  $b$  – половина ширины прорези, м;

$D$  – дозировка негашёной извести в грунте в долях от массы его твердой фазы;

$x$  – расстояние между прорезями, м;

$\rho_{\text{изв.}}$  – плотность негашёной извести, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{ск.гр.}}$  – плотность скелета грунта, кг/м<sup>3</sup>.

### Заключение

По результатам проведенных исследований подтверждены положения выносимые на защиту, а именно:

1. Приведена математическая модель процесса осушения глинистого грунта по средствам негашёной извести в рамках предложенной технологии сосредоточенного воздействия извести для технической мелиорации глинистых грунтов;

2. Приведены математические зависимости характеристик прочности и деформируемости глинистых грунтов, обработанных известью;

3. В докладе представлены результаты экспериментальных исследований закономерностей изменения характеристик прочности и деформируемости глинистых грунтов, обработанных известью;

4. Разработана технология комплексной технической мелиорации глинистых грунтов с повышенной влажностью для сооружения земляного полотна и подвержена опытным путем;

5. Приведены параметры для проектирования слоев дорожной одежды при технической мелиорации по разработанной технологии;

*Список работ, опубликованных автором по теме диссертации*

1. 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>;
2. Алькаев Е.Н., Сиротюк В.В. Техническая мелиорация грунтов повышенной влажности; Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации.; Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. 2019. СибАДИ. С.208-211.
3. Алькаев Е.Н., Сиротюк В.В. Критический анализ методов технической мелиорации глинистых грунтов с повышенной влажностью при возведении земляного полотна; Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации; Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции. 2019.
4. Метод технической мелиорации грунтов с использованием негашёной извести., Алькаев Е.Н., Сиротюк В.В.; Заявитель и патентообладатель СибАДИ; Номер патента: RU 2717154 С1; Номер заявки: 2019133443; Дата регистрации: 21.10.2019; Дата публикации: 18.03.2020;
5. Лунёв А.А., Алькаев Е.Н., Применение «Arduino» и совместимых компонентов для определения влажности грунтов; Лунёв А.А., Алькаев Е.Н., Тюскляйнен Д.В., Ложников Д.Н., Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации.; Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. 2019. СибАДИ.
6. Е.Н. Алькаев, Л.Ф. Рахуба., Сопоставление и анализ классификаций и методов испытаний грунтов по российским и зарубежным стандартам; Техника и технологии строительства. – 2019. – № 2(18). – С. 17-21.

## Заключение

### кафедры «Проектное управление и информационное моделирование в строительстве»

Научный доклад на тему: «Разработка технологии комплексной технической мелиорации глинистых грунтов с повышенной влажностью для сооружения земляного полотна» выполнен в ФГБОУ ВО «СибАДИ» аспирантом группы ТТС-18MAZ1 5 курса заочной формы обучения Алькаевым Е.Н. по направлению подготовки 08.06.01 «Техника и технологии строительства» научной направленности: «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей».

Научный руководитель – Рычкова Оксана Алексеевна, к.т.н., доцент.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

- научный доклад по научно-квалификационной работы (диссертации) аспиранта Алькаева Е.Н. соответствует направлению подготовки 08.06.01 «Техника и технологии строительства», в соответствии с которым он заявлен;

- в научном докладе достоверные сведения о работах, опубликованных соискателем ученой степени;

- научный доклад рекомендован к защите.

Рекомендовано: провести экспериментальные исследования предлагаемой технологии комплексной технической мелиорации глинистых грунтов с повышенной влажностью при сооружении земляного полотна.

На заседании кафедры присутствовало – 12 человек.

Заключение принято на заседании кафедры «Проектное управление и информационное моделирование в строительстве».

Заведующий кафедрой «ПУИМС»



к.т.н., доцент, Ю.В. Коденцева

## **ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ НА НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

### **Об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)**

аспиранта Алькаева Евгения Николаевича 5 курса заочной формы обучения направления подготовки 08.06.01 «Техника и технологии строительства» научная направленность: «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» на тему: «Разработка технологии комплексной технической мелиорации глинистых грунтов с повышенной влажностью для сооружения земляного полотна».

Рассмотренный автором вопрос является актуальным для науки и общества в целом. Главенствующим вопросом, представленным на рассмотрение в научном труде, является: разработка технологии комплексной технической мелиорации глинистых грунтов повышенной влажности с использованием извести для сооружения земляного полотна. В работе четко и ясно определены объект и предмет, а также сформулированы цель и задачи исследований. Содержание научного доклада полностью раскрывает тему проводимых исследований.

В первой главе научной работы выполнен анализ методов технической мелиорации грунтов с повышенной влажности, а именно отдельно рассмотрены методы осушения и укрепления глинистых. В качестве вывода автор предлагает использовать новую технологию комплексной технической мелиорации грунтов с повышенной влажностью для сооружения земляного полотна, при которой грунт в дополнение осушению в карьере укрепляется.

Во втором разделе приведено теоретическое обоснование параметров комплексной технологии технической мелиорации грунтов с использованием извести. Рассмотрены физико-химические процессы происходящие при осушении и укреплении глинистых грунтов известью. Оценка достоверности полученных результатов подтверждается выполненными математическими расчетами.

Третий раздел посвящен экспериментальному обоснованию эффективных параметров технологических процессов при осушении и укреплении грунтов с использованием извести. Экспериментальная проверка затрагивала аспекты величины и интенсивности поглощения влаги известью из глинистых грунтов, а так же изменение физико-механических свойств укрепленных грунтов.

В четвертом разделе проведена опытно-производственная проверка оценка предлагаемых конструктивно-технологических решений. Описаны особенности технологии комплексной технической мелиорации грунтов при сосредоточенном введении извести. Приведена оценка рациональных геометрических параметров при сосредоточенном введении извести в грунтовый массив.

К достоинствам представленной диссертационной работы можно отнести оригинальный подход к методике осушения и укреплению глинистых грунтов, а также возможность практического применения методики при строительстве.

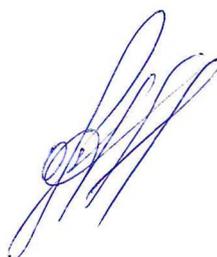
Теоретические и экспериментальные исследования Е.Н. Алькаева опубликованы в 7 научных трудах, 1 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных перечнем ВАК.

Алькаев Е.Н. принял участие в 3 конференциях, в том числе международных.

В целом научный доклад выполнен в соответствии с направлением подготовки 08.06.01 «Техника и технологии строительства» научной направленности: «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей», а также требованиям, предъявляемым к научному докладу по научно-квалификационной работе (диссертации).

Научный доклад по научно-квалификационной работе (диссертации) «Разработка технологии комплексной технической мелиорации глинистых грунтов с повышенной влажностью для сооружения земляного полотна» Алькаева Евгения Николаевича по направлению подготовки 08.06.01 «Техника и технологии строительства» научной направленности: «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» заслуживает положительной оценки.

Канд. техн. наук, доцент



О.А. Рычкова