
УДК 624.138

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.168.2017.101727>

ОБЗОР МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ МЕЛИОРАЦИИ ГРУНТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Аспиранты А. С. Волкова, К. П. Лоцман

ОГЛЯД МЕТОДІВ ТЕХНІЧНОЇ МЕЛІОРАЦІЇ ҐРУНТІВ, ЯКІ ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ В ДОРОЖНЬОМУ БУДІВНИЦТВІ

Аспіранти А. С. Волкова, К. П. Лоцман

REVIEW OF METHODS OF TECHNICAL MELIORATION OF SOILS USED IN ROAD CONSTRUCTION

Pg. A. S. Volkova, K. P. Lotsman

В статье приведен аналитический обзор и классификация существующих методов технической мелиорации грунтов, которые применяются при строительстве. Дано краткое описание по каждому из методов, приведена область применения, выделены основные преимущества и недостатки. Исходя из анализа дано обоснование целесообразности и направления проведения исследований по механизации методов укрепления грунта, которые применимы в дорожном строительстве.

Ключевые слова: *техническая мелиорация грунтов, укрепление грунтов, физико-механические свойства, гранулометрический состав.*

У статті наведено аналітичний огляд і класифікація існуючих методів технічної меліорації ґрунтів, які застосовуються при будівництві. Далі в роботі дано короткий опис по кожному з методів, наведена галузь застосування, виділені основні переваги та недоліки. Виходячи з аналізу дано обґрунтування доцільності та напрямку проведення досліджень з механізації методів зміцнення ґрунту, які можна застосувати в дорожньому будівництві.

Ключові слова: *технічна меліорація ґрунтів, зміцнення ґрунтів, покращення фізико-механічних параметрів, гранулометричний склад.*

The development of transport infrastructure is a process of constant and necessary to ensure the growth of economy any country. He undoubtedly entails a rise in the number of used transport and consequently an increase in the volume of transported goods. Therefore, should take into account the fact that the development of transport infrastructure entails stricter requirements for the quality of the roads. Considering the established conservative technology in road construction, this article describes the relevance of the use of new methods of construction. For this it was reviewed and analyzed ways to apply and improve the methods of soil stabilization in road construction. As in the construction sector there are a considerable number, there is a need in detailed study of each of the methods. This will allow us to understand which of these methods is the most promising for the road construction, taking into account his improvement. Therefore, the article presents an analytical review and classification of existing methods of soil improvement that are possible for use in industrial, civil and road construction. Also, this is a brief description for each of the methods: what types of soils we apply the method, and what physical and mechanical parameters we can modify by application of the method. Also given the scope of each of the methods, the main advantages and disadvantages. Based on the analysis, given the rationale and areas for conducting research on the mechanization and automation of methods of soil strengthening, which are applicable in road construction.

Keywords: *technical soil stabilization, soil strengthening, improvement of physical and mechanical parameters, granulometric composition.*

Введение. Развитие транспортной инфраструктуры в современный период ведет к постоянному увеличению количества используемого транспорта и объемов перевозок различных грузов. Поэтому строительство дорог различного назначения – это процесс, который в условиях развития современной инфраструктуры не должен быть остановлен. Увеличение объемов перевозок влечет за собой значительный рост грузонапряженности, что само по себе требует повышения несущей способности дорожных оснований и улучшения качества покрытий как старых, так и вновь построенных дорог. Поскольку технология строительства за последние годы

установилась в определенном порядке и в большей степени является консервативной, то строительство новых участков дорог является процессом, который требует значительных финансовых и материальных затрат. С учетом постепенного истощения ископаемых для производства строительных материалов первоочередной задачей является максимальная минимизация строительных затрат. Выходом из данной ситуации может стать применение при строительстве дорожных оснований и одежд грунтов и других местных материалов в укрепленном виде. Согласно [1], при условии сохранения прочности, применение технологий с использованием укрепленных грунтов

вместо традиционных технологий с использованием каменных материалов может привести к снижению стоимости затрат на строительство в размере 20...60 %. Это достигается за счет применения стабилизаторов, которые способствуют повышению прочностных и деформационных характеристик грунта, а это путь к снижению потребности в дорогостоящих каменных материалах [2].

Данные технологии могут также найти применение в местах, где нет большой грузонапряженности (дороги внутри дачных или коттеджных поселков, различные спортплощадки, корты и т.д.), или же при строительстве временных дорог особого назначения (лесовозные и карьерные дороги). Чтобы понять, какой из методов укрепления выгоден в том или ином строительстве, необходимо провести детальный анализ всех существующих методов укрепления и определить их возможные преимущества и недостатки.

Основная часть. В любом регионе нашей страны в местах строительства дорог имеются в наличии природные дисперсные грунты, которые используются для строительства земляного полотна. Существенными недостатками этих грунтов являются очень малые значения прочностных параметров и параметров деформируемости [3-5]. Причем у большинства грунтов эти параметры зависят как от степени уплотнения, так и от влажности и гранулометрического состава. Улучшение физико-механических свойств местных грунтов практически всегда осуществляется при помощи применения методов технической мелиорации.

Техническая мелиорация – это наука, которая изучает и разрабатывает методы искусственного изменения свойств горных пород в соответствии с требованиями различных видов строительства [6]. Согласно [1, 6], методы технической мелиорации в зависимости от применимости делятся на два направления:

- поверхностные методы укрепления грунтов: используются в дорожном,

аэродромном и гидротехническом строительстве;

- глубинные (массивные) методы укрепления грунтов: используются в гражданском и гидротехническом строительстве.

Деление методов технической мелиорации в зависимости от технологии процесса имеет некую условность, так как большинство из них по своему содержанию не могут находиться в рамках одной какой-либо группы и зачастую довольно тесно связаны друг с другом [7]. Но несмотря на это существует классификация, согласно которой методы технической мелиорации делятся на три основных группы: физико-механические, физико-химические, химические [1, 6-8].

Физико-механические методы основаны на процессах размельчения, перемешивания и уплотнения грунта, которые способствуют более тесному контакту частиц грунта (уменьшение пористости), как между собой, так и с частицами вяжущего вещества, вводимого в грунт. Их более подробная классификация имеет следующий вид:

1) механические методы – базируются в основном на улучшении грунта путем смешивания и уплотнении грунта с помощью внешних нагрузок (давления, ударов, вибраций). Они включают в себя следующие способы:

- улучшение гранулометрического состава грунта;

- механическое уплотнение дисперсных грунтов статическими и динамическими нагрузками (гравитационное уплотнение, уплотнение грунтов укаткой, уплотнение грунтов трамбованием);

- сейсмическое уплотнение грунтов (уплотнение грунтов глубинными внутренними взрывами, уплотнение подводными взрывами – бывает как поверхностным, так и глубинным);

- виброуплотнение грунта (поверхностное, осуществляемое с помощью вибрирующей плиты, и глубинное гидроуплотнение, осуществляемое импульсной подачей воды);

- уплотнение грунтового массива сваями;
- армирование грунта (с использованием геосинтетиков и случайно распределенных волокон);
- улучшение работы грунтовых основ;
- обезвоживание грунта (осуществляется с помощью самотечного или гидродинамического дренажа);
- водонасыщение грунтов (замачивание).

Улучшение гранулометрического состава подразумевает под собой доведение состава грунта до состояния оптимального соотношения песчаных, пылевых и глинистых частиц [8]. Примером может быть ситуация, когда для достижения оптимального состояния в суглинки или пылеватые супеси добавляют гравий или же песок, а в гравий или крупнозернистый песок – суглинок. Таким образом удастся достигать удовлетворяющие показатели стойкости, несущей способности и сопротивления сдвигу между частицами грунта. Для осуществления этого метода, в основном, используются графоаналитические методы, такие как треугольная диаграмма Ферре [8].

Метод гравитационного уплотнения используется для уплотнения рыхлых и водонасыщенных грунтов (ил, торфяники) [7]. Осуществляется посредством приложения статических нагрузок, бывает наземным и подводным.

Уплотнение грунтов укатыванием чаще всего применяется в строительстве дорог, при подготовке оснований под полы в промышленных цехах, после планировки строительных площадок. Метод не является конечным сам по себе и поэтому требует создания твердых покрытий для обеспечения несущей способности и восприятия внешних нагрузок.

Трамбование имеет наибольшее применение в промышленно-гражданском строительстве [7]. Этот метод наиболее применим для пылевато-глинистых грунтов. В основном для трамбования

используют трамбующие машины, которые с некоторой высоты сбрасывают железобетонные или металлические трамбующие элементы массой до 7 тонн. В отдельных случаях могут использоваться сверхтяжелые трамбовки – массой до 80-100 тонн. При производстве работ таким методом возможны однослойное и двухслойное уплотнения, глубина утрамбованного грунта соответственно – 3,5 и 5 метров.

Методы сейсмического уплотнения реализуются при использовании энергии от взрывов. Как и предыдущий метод, этот метод используется при глубинном уплотнении массивов грунтов.

Виброуплотнение, в основном, применяется для песков и песчаных смесей. Поверхностное виброуплотнение производится вибрирующей плитой и используется для уплотнения оснований, дорожных одежд, песчаных подушек и насыпей. Глубинное уплотнение делается глубинными вибраторами с одновременным водонасыщением грунтов. Метод в основном применим для уплотнения оснований и позволяет повысить несущую способность грунтов.

Укрепление сваями является методом глубинного уплотнения – сперва создаются буровые скважины, далее они заполняются грунтом или иными наполнителями с последующим уплотнением. Такой метод уплотнения придает прочность грунтовым массивам и устраняет их просадочные свойства [7].

Метод армирования предполагает при возведении грунтовых конструкций использование специальных элементов, которые позволяют улучшить механические свойства грунта [8]. Находясь в составе грунтовой конструкции, армирующие элементы воспринимают часть нагрузки и перераспределяют напряжения по всей площади армирования. Наиболее перспективными в использовании являются геосинтетические материалы – объемные георешетки,

плоские геосетки, геоткани и геополотна. В отдельных случаях целесообразно применение метода распределения случайных волокон [9]. Его суть состоит в том, чтобы отдельные волокна (натуральные, искусственные, минеральные) смешать с массой грунта и тем самым придать ей усиленные характеристики.

В случаях, когда в основе находятся залежи слабого грунта (ил, торф, текучие глинистые грунты), целесообразно делать их замену на другие, которые имеют достаточно высокие механические характеристики – создание так называемой грунтовой подушки [10]. Метод имеет название улучшения работы грунтовых основ.

Обезвоживание грунта необходимо при его сильном насыщении водой или влагой. Такое бывает при близком расположении уровня грунтовых вод или при сезонном водонасыщении (например, весной при таянии снега). Чтобы избавиться от излишней воды, сооружают специальные дренажные системы. Метод чаще всего используется для предотвращения попадания воды на строительные площадки – поэтому является не основным, а защитным.

Метод водонасыщения или замачивания применим при строительстве на просадочных грунтах. Согласно [7], суть метода заключается в том, что при определенном насыщении водой под действием собственного веса или в сочетании с нагрузкой от объекта строительства разрушается структура грунта, он уплотняется и теряет свои просадочные свойства. Этот метод применим в промышленно-гражданском строительстве, как до проведения строительных работ, так и в период эксплуатации объектов;

2) физические методы [7, 9, 10] используют физические поля (электрические температурные, магнитные). Применение этих методов позволяет повышать такие параметры грунта, как прочность, плотность, водо- и

морозостойкость, а также устранять их просадочные свойства. Наиболее широкое распространение получили такие методы:

- электрохимическое закрепление (упрочнение пород с помощью постоянного электрического тока, как с добавками, так и без);

- термическое уплотнение (глубинный обжиг без нарушения строения грунта, термическое упрочнение грунтов с нарушенным строением, замораживание грунта;

- электроосушение (электроосмотическое осушение).

Суть методов заключается в том, чтобы пропустить постоянный электрический ток через сильно влажные глинистые грунты [7, 8]. Для этого в грунт забивают специальные электроды и пускают ток от источника питания. При этом возникают химические реакции и образуются вещества, которые упрочняют структуру грунта. Во время прохождения тока вода из порообразований постепенно передвигается от анода к катоду, что обеспечивает дополнительное осушение грунта (электроосмос) [9]. Эффективность метода можно увеличить, если предварительно ввести в грунт растворы солей или химических веществ, которые могут поспособствовать образованию новых и более прочных структурных связей.

При обжиге используют высокие температуры, которые обжигают грунт и таким образом придают ему прочность [7, 9]. Для этого в грунте сначала бурят скважины, а потом в них подают горячие газы, которые и обжигают грунт. Другой вариант этого метода – сжигание горючего вещества в самих скважинах. От такого воздействия в радиусе 1-1,5 метра от скважины грунт превращается в камнеподобное состояние, похожее на кирпич, становится прочным, водостойчивым и теряет просадочные свойства.

Использование отрицательных температур главным образом применяется при закреплении обводненных грунтов с целью прекращения движения грунтовой

воды и проникновения ее в строительный котлован [7, 9]. Суть состоит в том, что вокруг места работ бурятся скважины, в которые потом подается холодный раствор (обычно это раствор хлористого кальция). От холода раствора вода замерзает и вокруг

котлована образуется лёдогрунтовая стенка, что дает возможность проведения строительных работ.

Вышеперечисленные методы, их сфера применения, основные преимущества и недостатки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические методы улучшения грунта

Название метода	Разновидность	Рекомендуемые грунты	Преимущества / недостатки	Сфера применения
1	2	3	4	5
Улучшение гранулометрического состава грунта	-	Пески, пылеватые супеси, суглинки	Относительно прост / не является конечным	При подготовке к выполнению строительных работ
Уплотнение	Гравитационное уплотнение	Рыхлые, водонасыщенные (ил, торфяники), сильносжимаемые	Отсутствие потребности в механизации / потребность в дополнительных материалах, высокая трудоемкость	При подготовке к выполнению строительных работ
	Укатывание	Дисперсные грунты при определенном водонасыщении	Относительно прост, не нуждается в механизации / небольшая толщина уплотнения	Послойное возведение насыпей земляного полотна, земляных подушек, основ под полы
	Трамбование	Песчаные, песчано-гравийные, пылевато-глинистые грунты	Простота метода, возможность применения в зимних условиях / быстрый износ механизмов и тросов машин	В промышленном и гражданском строительстве
	Сейсмическое уплотнение	Просадочные грунты, супеси, суглинки, лессовые грунты	Возможность быстрого уплотнения, небольшая стоимость / необходима определенная влажность грунтов, неравномерное уплотнение по толщине слоя, невозможность применения вблизи зданий и сооружений	В промышленном и гражданском строительстве

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
	Виброуплотнение	Песчаные, песчано-гравийные, пылевато-глинистые грунты	Простота в эксплуатации, маневренность / грунт должен обладать оптимальной влажностью, плотность грунта по глубине неравномерна	В промышленном, гражданском и дорожном строительстве
Укрепление сваями	Сваи буронабивные	Все грунты (исключая скальные, крупнообломочные, обводненные, структурно-неустойчивые)	Экономия материалов (изготавливают любой длины), возможность проведения работ вблизи зданий и сооружений, отсутствие значительных динамических воздействий / по всей высоте сваи невозможно контролировать плотность и монолитность бетона, возможен размыв грунтовыми водами незастывшего бетона	В промышленном и гражданском строительстве
	Сваи вибротрамбованные	Сухие связные грунты	Изготовление свай с различной несущей способностью / шумность, запрет проведения работ вблизи зданий	В промышленном и гражданском строительстве
	Сваи бурозавинчивающиеся	При любых геословиях	Быстрота и всесезонность монтажа, использование на сложных рельефах и любых грунтах / коррозия, сложный контроль качества сварных швов	В промышленном и гражданском строительстве
	Песчаные сваи	Водонасыщенные пески, содержащие органические примеси, лессовые просадочные грунты	Экономичность / необходимость очень тщательного уплотнения грунта	В промышленном и гражданском строительстве

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
Армирование	Семейство геосинтетиков	Глинистые, просадочные, на территориях со сложными гидрогеологическими климатическими условиями	Простота проведения работ, применение в стеснённых условиях, экономичность, экологичность / сложность в бережном обращении с некоторыми материалами	При укреплении в гражданском и дорожном строительстве
	Случайно распределенные волокна	Все виды грунтов, кроме переувлажненных	Широкий спектр применяемых материалов / сложность контроля равномерности смеси	При укреплении в гражданском и дорожном строительстве
Улучшение работы грунтовых основ	-	При работах на слабых грунтах (ил, торфяники)	Относительно недорогой / не всегда прост в осуществлении	В промышленном и гражданском строительстве
Обезвоживание	Иглофильтры, дренажи	Песчаные грунты, супеси	Быстрота действия, малая трудоемкость / невозможность проведения работ вблизи зданий и сооружений	В промышленном и гражданском строительстве
	Вакуумный метод	Мелкозернистые грунты	Возможность применения в сложных гидрогеологических условиях / необходимость постоянного использования энергии и отвода выкачанной воды	В промышленном и гражданском строительстве
Водонасыщение	-	Просадочные грунты	Относительно прост и недорогостоящ / сезонность применения	В промышленном и гражданском строительстве
Электрохимическое закрепление	Как с добавками, так и без	Переувлажненные глинистые грунты и супеси	Самый подходящий метод для водонасыщенных грунтов / необходимость периодической смены полярности	В промышленном и гражданском строительстве

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
Электро-осмос	-	Переувлажненные глинистые грунты и супеси	Самый подходящий метод для водонасыщенных грунтов / необходимость периодической смены полярности	В промышленном и гражданском строительстве
Термическое закрепление	Обжиг горячими газами или сжигаемым топливом	Увлажненные лесовидные и пылевато-глинистые грунты	Относительно быстрый набор прочности / высокая цена	В промышленном и гражданском строительстве
	Замораживание рассольное либо с помощью азота	Водоносные грунты (от глинистых до скальных трещиноватых и кавернозных)	Возможно использование любых водоносных грунтов, на любой глубине, наличие хорошо развитой научно-технической базы / небольшая продолжительность сохранения эффекта (только при действии замораживающей установки), естественное оттаивание продолжительно, влажность грунта повышается (так как происходит миграция воды от теплых к охлажденным слоям грунта)	В промышленном и гражданском строительстве

Физико-химические методы предназначены для обработки дисперсных грунтов на поверхности. Их суть [6, 7] состоит в том, чтобы обработать грунты небольшими дозировками реагентов (в количестве 1...3 % от веса грунта), которые изменяют обменную способность грунта. Цель таких методов заключается в том, чтобы либо изменить параметры структуры грунтов (диспергация, агрегация), либо их защитить (гидрофобизация).

К физико-химическим методам относятся:

- кольматация и глинизация грунтов;

- солонцевание грунтов;
- гидрофобизация грунтов.

Кольматация является собой процесс насыщения порового пространства грунта мелкими водонерастворимыми (пылеватыми или глинистыми) частицами [6]. Они забивают имеющееся пространство между структурными частичками грунта и тем самым ухудшают его фильтруемость. Это не дает укрепляемому грунту насыщаться водой.

Глинизация (тампотаж) – это способ укрепления, при котором вымыв глинистых суспензий в поры и трещины пород

осуществляется под давлением до 20 атмосфер, а иногда и более [6].

Солонцевание грунтов – это обработка грунтов соляными растворами. Действие метода заключается в диспергации грунтовых масс путем замены в их поглощающем комплексе обменных многовалентных катионов (кальция и магния) на одновалентные (натрия и калия) [6, 7].

Гидрофобизация это – метод, при котором грунтовые структуры покрывают поверхностно-активными веществами (ПАВ) [6]. Такая обработка позволяет грунту отталкивать воду и за счет этого удерживаться в связанном состоянии.

Методы, приведенные выше, чаще всего используются в дорожном и аэродромном строительстве. В табл. 2 показано краткое основное содержание по каждому из физико-химических методов.

Таблица 2

Физико-химические методы улучшения грунта

Название метода	Разновидность	Рекомендуемые грунты	Преимущества / недостатки	Сфера применения
Кольматация	-	Супеси, суглинки и лессовые грунты	Обеспечение порозаполняемости во всем объеме грунта на все время / использование только при условии отсутствия дренажа	В промышленном, гражданском и дорожном строительстве
Глинизация	-	Скальные, гравелистые, трещиноватые грунты и супеси	Упрочняют структуру обрабатываемого грунта / метод применим только для сухих пород и при условии небольших скоростей движения грунтовых вод	В промышленном, гражданском и дорожном строительстве
Солонцевание	-	Глинистые и суглинистые грунты	Не требует сложных технологий и материальных затрат / негативно влияет на окружающую среду и качество грунтовых вод	В промышленном, гражданском и дорожном строительстве
Гидрофобизация	-	Глинистые и суглинистые грунты	Не требует сложных технологий и материальных затрат / негативно влияет на окружающую среду, относительная дороговизна некоторых ПАВ	В промышленном, гражданском и дорожном строительстве

Действие химических методов основано на введении в грунт химических реагентов в количестве 1-5 %. При

подобных методах упрочнение грунтов происходит за счет изменения их состава и характера структурных связей между

частицами. В химических методах в качестве реагентов используют органические и минеральные вяжущие вещества, а также различные стабилизаторы грунта. Обработка органическими вяжущими и стабилизаторами используется при проведении поверхностных методов укрепления, обработка неорганическими вяжущими – при проведении глубинных методов. Результатом изменения свойств грунтов при использовании подобных методов становится увеличение прочности, водо- и морозостойкости, уменьшение водопроницаемости [1, 6-10].

Методы химической стабилизации включают в себя:

- упрочнение грунтов органическими вяжущими веществами (битумизация (холодная и горячая), упрочнение грунтов синтетическими полимерными смолами), применение энзимов;

- упрочнение грунтов минеральными вяжущими веществами (цементация, известкование, использование шлаков, зол уноса, шлаковых цементов, гипсовых и ангидридовых вяжущих);

- силикатизация – упрочнение грунтов растворами силиката натрия (одно- или двухрастворная силикатизация, газовая силикатизация).

Битумизация основана на введении в грунт битумов [7, 9-12]. Они могут быть в виде расплавов, эмульсий, паст. Битумные смеси используются как горячие, так и холодные. Битумизация применима в глубинном и поверхностном укреплении. В большинстве случаев горячая битумизация сочетается с холодной, так как горячий битум не может проникнуть в мелкие трещины (менее 1 мм). Холодная битумизация считается тем успешнее, чем мельче частицы битума в эмульсии.

Смолизация – упрочнение грунтов синтетическими полимерами (смолами) [6, 9, 10]. Грунт и клеящее вещество образуют массив с улучшенными характеристиками (твердый, однородный). В качестве клеящих используют различные вещества:

фенолформальдегидные, мочевиноформальдегидные (карбамидные), фенолфурфурольные, фурфуроланилиновые. Склеивание грунтов может осуществляться разными методами: последовательно – первым закачивают клей (раствор смолы), далее – отвердитель, и одновременно – закачивание в грунт клея и отвердителя, смешанных до начала процесса.

Метод укрепления грунтов с помощью энзимов [9] используется для укрепления грунтов под линейные объекты строительства (дороги, железные дороги, трубопроводы и т.д.). В полимерной структуре энзимов есть полости, которые включают гидрофобные и гидрофильные радикалы и группировки. Поверхностное натяжение воды уменьшается, если растворить в ней фермент, поскольку энзимы обладают свойствами ПАВ и действуют как гидрофобизирующие вещества. В результате молекулярное и электростатическое взаимодействие между частицами грунта усиливается. Так как структура воды изменяется, это способствует ее интенсивному удалению. Таким образом создается более плотный грунт.

Методы укрепления грунтов минеральными вяжущими имеют большое разнообразие, так как в качестве реагентов используется огромная вариация минеральных веществ [13-22]. Для укрепления естественных и техногенных грунтов применяют следующие основные минеральные вяжущие материалы:

- портландцемент, шлакопортландцемент, известково-шлаковый цемент, а также другие виды цементов марок не ниже 300;

- известь молотую негашеную, известь гидратную, известь гидрофобизированную 1-го и 2-го сортов.

В качестве вяжущих или их компонентов используют следующие неорганические отходы и побочные продукты производства:

- гипсошлаковые и портландцементошламовые вяжущие;

- золы уноса сухого отбора;
- золошлаковые смеси гидроудаления;
- пыль уноса цементных заводов;
- нефелиновый шлам и бокситовый шлам;
- фосфополугидрат кальция;
- комплексные вяжущие (состоят из основного компонента и активатора твердения).

Наряду с традиционным использованием органических и минеральных вяжущих для укрепления грунтов в последнее время широкое применение приобретают стабилизаторы грунта. Все стабилизаторы по своему составу и природе взаимодействия с грунтами объединены в два основных класса [13]: к первому классу относят ионные закрепители глинистых грунтов (в основном применимы для глинистых

грунтов), ко второму классу относят полимерные эмульсии (в основном применимы для песчаных грунтов). Результаты исследований и опытных работ [13, 22] с использованием стабилизаторов дали основания для следующих выводов:

- применение стабилизатора позволяет снизить величину оптимальной влажности грунта и способствует повышению плотности слоя на 5-10 %;
- использование стабилизаторов дает возможность увеличить прочность и модуль упругости обработанных грунтов (рис. 1) [13];
- водонасыщение грунтов, обработанных стабилизатором, по отношению к необработанным снижается в 1,3-2,5 раза;
- прочность обработанного грунта зависит от концентрации стабилизатора (рис. 2) [22].

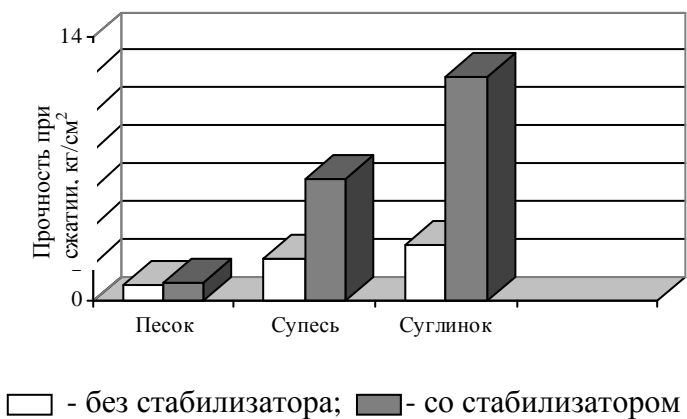


Рис. 1. Зависимость прочности грунтов от наличия добавки стабилизатора

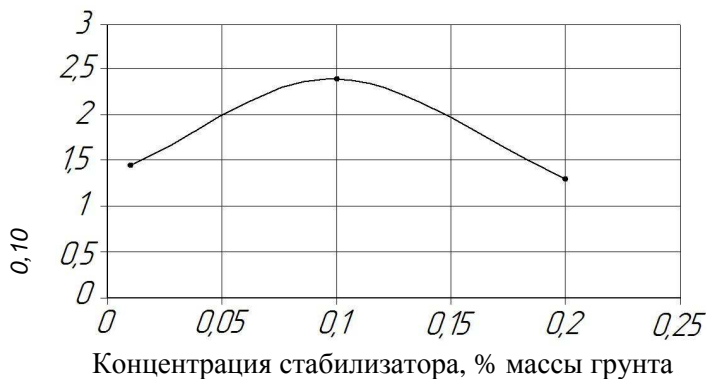


Рис. 2. Зависимость прочности суглинка от концентрации стабилизатора

Метод силикатизации [7, 9, 10] основан на внедрении в состав грунта технического силиката натрия (жидкого стекла), который реагирует с частицами грунта и в процессе реакции выделяет гель – играет роль искусственного цемента грунтов. Упрочнение достигается путем нагнетания жидкого стекла специальными инъекторами. В результате этого грунты становятся прочными, водонепроницаемы-

ми и теряют свои просадочные свойства. Метод применим как до строительства, так и во время эксплуатации объекта. Отличительной особенностью метода является то, что при применении в лессовых грунтах силикатизации можно подвергать всю просадочную толщу лессового массива. Краткая характеристика некоторых химических методов закрепления грунта приведена в табл. 3.

Таблица 3

Химические методы улучшения грунта

Название метода	Разновидность	Рекомендуемые грунты	Преимущества / недостатки	Сфера применения
1	2	3	4	5
Битумизация	Горячая	Скальные трещиноватые породы	Возможность применения грунтов с любыми агрессивными водами, для больших скоростей водного потока / сложное техническое оборудование, повышенные меры безопасности	В промышленном, гражданском и дорожном строительстве
	Холодная	Скальные трещиноватые породы, пески	Экономия топлива, трудозатрат, битума / сильная текучесть битума (возможность прорыва битумизационной завесы под большим давлением грунтовых вод)	В промышленном, гражданском и дорожном строительстве
Смолизация	Одно- или двухрас-творная	Песчаные и лессовые грунты	Высокая прочность, быстрый набор прочности, устойчивость грунта к действию агрессивных сред / выделение карбамидными смолами токсичного формальдегида	В промышленном и гражданском строительстве
Укрепление энзимами	-	Глинистые грунты	Экономия затрат на этапах строительства и эксплуатации / отсутствие нормативов, малая изученность метода	В промышленном, гражданском и дорожном строительстве

1	2	3	4	5
Укрепление минеральными вяжущими	Цементация, известкование, применение зол уноса, шлаков, шламов и комплексных вяжущих	Гравелистые, крупные и среднезернистые пески, глины	Высокая скорость, возможность работать в стесненных условиях, гибкость, маневренность / дорогостоящее оборудование	В промышленном, гражданском и дорожном строительстве
Применение стабилизаторов	Разновидность методов заключается в разновидности стабилизаторов	Глинистые грунты, суглинки, супеси	Высокие показатели улучшения обрабатываемых грунтов / применение дорогостоящих материалов и оборудования	В промышленном, гражданском и дорожном строительстве
Силикатизация	Однорастворная	Пески, пылеватые пески (пывуны), лессовые, просадочные грунты	Надежность, долговечность, экономичность. Отсутствие воздействия агрессивных сред / ограничение по влажности грунта	В промышленном и гражданском строительстве
	Двухростворная		Экономия времени, высокая прочность, более однородный массив (по сравнению с однорастворной) / ограничение по влажности грунта	
	Газовая		Укрепление за короткий промежуток времени / повышенные экономические затраты	

Влияние гранулометрического состава на физико-механические свойства стабилизированных грунтов наименее изучено. Так, в работе [23] указывается, что «в нормативных документах не приводятся указаний к выбору гранулометрического состава..., однако если требуются упругая работа насыпи и высокие фильтрационные

характеристики (насыпи под автомобильные дороги и железные дороги, подготовка дна котлована), следует использовать однородные гранулометрические составы, обеспечивающие стабильную структуру грунта и высокие значения модуля деформации».

Достигнуть требуемой однородности грунта в дорожном строительстве можно путем его дробления и измельчения механизированным способом на этапе смешивания с активными компонентами. Этот процесс измельчения и смешивания грунта энергоемкий, но он будет определять качество насыпи. С точки зрения механизации, указанные операции требуют применения специальных механизированных средств, таких как ресайклеры [1, 13], в которых осуществляется ввод активных добавок и интенсивное смешивание.

Заключение. Анализ существующих методов технической мелиорации показал, что в дорожном строительстве применяются лишь некоторые из них: уплотнение укатыванием и с помощью вибрации, армирование геосинтетиками, кольматация, глинизация, солонцевание, гидрофобизация, битумизация, применение энзимов, укрепление с помощью минеральных вяжущих и специальных стабилизаторов. Большинство из этих методов являются перспективными для дальнейшего развития или модернизации, но те, которые входят в группы физико-химических и химических, являются наиболее перспективными. Их развитие и совершенствование требует, с одной стороны, минимизации затрат на строительство, а с другой стороны – обеспечения соответствующего качества дорог. Такая задача, на наш взгляд, может быть решена путем оценки удельных затрат на выполнение механизированных работ, в том числе стабилизации грунтов, и удельных затрат по последующему текущему содержанию дорог, которые зависят, главным образом, от первоначального качества.

Проведенный обзор показал, что наименее изученным критерием, определяющим качество земляного полотна, является гранулометрический состав (распределение частиц по размерам) грунта, подлежащего стабилизации с

последующим уплотнением. Тогда задача исследователей в этом направлении сводится к поиску рациональной области среднего размера частиц грунта ($r_{\text{ср опт}}$) на основе оценки удельных затрат производства механизированных работ (C_1) и удельных затрат на последующее текущее содержание дороги (C_2), как это показано на рис. 3. Процесс измельчения грунтов и смешивания с активными компонентами является энергоемким, поэтому удельные затраты на выполнение таких работ будут тем выше, чем выше тонкость помола, рис. 3, кривая C_1 . С другой стороны, тонкость помола определяет физико-механические свойства насыпи, что оказывает влияние на затраты по текущему содержанию дороги. То есть с повышением размера частиц эти затраты могут расти, рис. 3, кривая C_2 , а кривая суммы двух удельных затрат будет иметь минимум, рис. 3, кривая ΣC , который, в конечном итоге определит рациональное значение $r_{\text{ср}}$.

Таким образом, поиск рационального гранулометрического состава местных грунтов при их стабилизации в дорожном строительстве является актуальной научно-технической задачей.

Выводы:

1. Преобладающим типом грунтов Украины, используемых в дорожно-строительных работах, являются глинистые грунты, суглинки и супеси. При их укреплении в насыпи чаще всего используются физико-химические и химические методы с последующим механическим уплотнением.

2. Среди множества факторов, оказывающих влияние на физико-механические свойства укрепленного грунта, наименее изученным является гранулометрический состав грунта. Здесь определяющими являются степень однородности и средний размер частиц, что может быть достигнуто за счет применения специальной техники, например, ресайклеров.

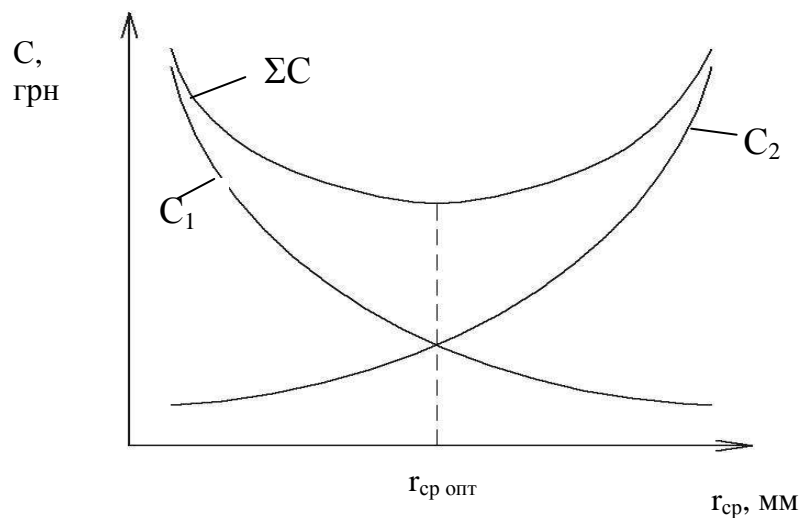


Рис. 3. Удельные затраты на строительство и текущее содержание дороги в функции среднего размера частиц стабилизируемого грунта

3. Процесс смешивания и дозированного ввода активных компонентов с последующим уплотнением является энергоемким, поэтому при производстве механизированных работ по укреплению грунтов следует в первую очередь оценивать процесс строительства с точки зрения экономических показателей и влияния на них перечисленных факторов.

4. Установление рациональной области среднего размера частиц грунта и степени однородности следует вести с учетом удельных затрат на производство механизированных работ и удельных затрат на последующее текущее содержание дороги, сумма которых имеет область минимума.

Список использованных источников

1. Ушаков, В. В. Строительство автомобильных дорог [Текст]: учебник / коллектив авторов; под ред. В. В. Ушакова и В. М. Ольховикова. – М.: Кнорус, 2013. – 576 с.
2. Разуваев, Д. А. Использование стабилизаторов грунтов при расширении сети автомобильных дорог местного значения [Текст] / Д. А. Разуваев, А. Л. Ланис // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Издательство ПНИПУ, 2012. – Т. 3. – С. 223-228.
3. ДСТУ Б А.1.1-25-94. Грунти. Терміни та визначення [Текст]. – Чинний з 1994–10–01. – К.: Держбуд України, 2001. – 52 с.
4. ДСТУ Б В.2.1-17: 2009. Основи та підвалини будинків і споруд. Грунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей [Текст]. – На зміну ГОСТ 5180-84; чинний з 2010-10-01. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. – 23 с.
5. ДСТУ Б В.2.1-4-96 (ГОСТ 12248-96). Основи та підвалини будинків і споруд. Грунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності та деформованості [Текст]. – На зміну ГОСТ 12248-78, ГОСТ 17245-79, ГОСТ 23908-79, ГОСТ 24586-90, ГОСТ 25585-83, ГОСТ 26518-85; чинний з 1997–04–01. – К.: Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, 1997. – 102 с.

6. Бабаскин, Ю. Г. Дорожное грунтоведение и механика земляного полотна дорог [Текст]: курс лекций / Ю. Г. Бабаскин. – Минск: БНТУ, 2002. – 197 с.
7. Ананьев, В. П. Инженерная геология [Текст]: учеб. для строит. спец. вузов / В. П. Ананьев, А. Д. Потапов. – 3-е изд., перераб. и испр. – М.: Высш. шк., 2005. – 575 с.
8. Чаусов, М. Г. Укріплення ґрунтів [Текст]: навч.-метод. посібник / М. Г. Чаусов, О. М. Бесараб, В. П. Ярославський; за заг. ред. проф., д.т.н. М. Г. Чаусова. – Ніжин: ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2013. – 184 с.
9. Игошева, Л. А. Обзор основных методов укрепления грунтов основания [Текст] / Л. А. Игошева, А. С. Гришина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 5-21. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.01.
10. Коробова, О. А. Усиление оснований и реконструкция фундаментов [Текст] : учеб. пособие / О. А. Коробова. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2008. – 332 с.
11. Budge, A.S. Subgrade stabilization ME properties evaluation and implementation [Text] / A.S. Budge, M.J. Burdorf // Final report, center for transportation research and innovation Minnesota State University. – Mankato. – 2012.
12. Hashemian L., Kavussi A., Homayoun H. Aboalmaali. Application of foam bitumen in cold recycling and hydrated lime in airport pavement strengthening [Text] / L. Hashemian, A. Kavussi, Homayoun H. Aboalmaali // Case Studies in Construction Materials. – 2014. – N 1. – P. 164–171.
13. Фурсов, С. Г. Автомобильные дороги и мосты. Строительство конструктивных слоев дорожных одежд из грунтов, укрепленных вяжущими материалами [Текст]: обзорная информация. Вып. 3 / Г. С. Фурсов. – М.: ФГУП «Информавтодор», 2007. – 81 с.
14. Эффективные технологии строительства дорог и аэродромов [Текст] // Журнал современных строительных технологий «Красная линия». Выпуск: ДОРОГИ. – 2012. – № 66. – С. 30-36.
15. Гусев, Н. К. Строительство конструктивных слоев аэродромных и дорожных одежд из местных материалов [Текст] / Н. К. Гусев // Наука и техника в дорожной отрасли. – М.: ЗАО «Издательство “Дороги”», 2013. - №2. – С. 21-22.
16. Beeghly, J. H. Recent experiences with lime-fly ash stabilization of pavement subgrade soils, base, and recycled asphalt [Text] / J.H. Beeghly // Proceedings of international ash utilization symposium. – Lexington. – 2003. – P. 435-452.
17. Magdi, M.E. Zumrawi. Stabilization of pavement subgrade by using fly ash activated by cement [Text] / Magdi M.E. Zumrawi // American Journal of Civil Engineering and Architecture. – 2015. – Vol. 3, no. 6. – P. 218-224. Doi: 10.12691/ajcea-3-6-5.
18. Makusa, G.P. Soil stabilization methods and materials (In engineering practice) [Text] / PhD student G.P. Makusa // Lulea university of technology. – Sweden. – 2012.
19. Oneylowe, K.C. A comparative review of soil modification methods [Text] / K.C. Oneylowe, F.O. Okafor // ARPN Journal of earth sciences. – November 2012. – Vol. 1, no. 2. – P. 36-41.
20. Olinic, T. The effect of quicklime stabilization on soil properties [Text] / T/ Olinic, E. Olinic // Agriculture and agricultural science procedia. – 2016. – N 10. – P. 444–451.
21. Celauro, B. Design procedures for soil-lime stabilization for road and railway embankments. Part 1 – review of design methods [Text] / B. Celauro, A. Bevilacqua, D. Lo Bosco, C. Celauro. – Procedia – social and behavioral sciences. – 2012. – N 53. – P. 755–764.
22. Инновационные технологии, материалы в промышленно-гражданском строительстве. О технологии полимерных эмульсий [Электронный ресурс]: информация / компания ООО «Комплекс Роудс». – Режим доступа: http://www.complrds.ru/teor_polimer.php.

23. Мирный, А. Ю. Зависимость сжимаемости несвязных грунтов от степени однородности гранулометрического состава [Текст] / А.Ю. Мирный, Е.А. Гайков, А.О. Зубов // Вестник Мордовского университета. – Саранск: Издательство Мордовского университета, 2016. – Т. 26. – С. 12-19. DOI: 10.15507/0236-2910.026.201601.012-019.

Волкова Анастасія Сергіївна, аспірант кафедри будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: an.vasyan@yandex.ru.

Лоцман Клеоніка Павлівна, аспірант кафедри будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин Українського державного університету залізничного транспорту.

Volkova Anastasiia, postgraduate student, Department of Construction, track and loading-unloading machines, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: an.vasyan@yandex.ru.

Lotsman Kleonika, postgraduate student, Department of Construction, track and loading-unloading machines, Ukrainian State University of Railway Transport.

Стаття прийнята 24.03.2017 р.