


Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Инженерно-строительный институт
Кафедра автомобильных дорог и городских сооружений

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 В.В. Серватинский

« 24 » июня 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Укрепление слабых грунтов основания автомобильных дорог методом
глубинной стабилизации

тема

08.04.01. Строительство

код и наименование направления

08.04.01.11. Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных
сооружений в суровых природно-климатических условиях Сибири

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель



подпись, дата

к.т.н., доцент

должность, ученая степень

Н.А. Артемьева

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

Ф.С. Потылицин

инициалы, фамилия

Красноярск 2020

АННОТАЦИЯ

Направление данной научно исследовательской работы по теме укрепление слабых грунтов основания автомобильных дорог методом глубинной стабилизации обусловлена необходимостью качественно повлиять на эксплуатационные свойства земляного полотна, основание и дорожное сооружение в целом в условиях суровых природно-климатических условиях Сибири.

Ввиду отсутствия должного развития данной технологии, которая имеет положительный опыт применения на примере экспериментальных исследований отдельных современных дорожно-строительных предприятий и научных институтов, возникает вопрос, актуально ли ее применение в реальных условиях Сибири? Какова эффективность и возможные перспективы использования глубинной стабилизации в дорожно-строительной отрасли?

Проанализировав вышеуказанные вопросы в научно исследовательской работе, возможно активизировать всеобщий интерес к поставленной проблеме и дать необходимый толчок в развитии технологии укрепления слабых грунтов методом глубинной стабилизации с целью внедрения в практическую деятельность.

В научно-исследовательской работе рассмотрены вопросы о слабых грунтах, понятии стабилизации, методике исследования характеристик слабых грунтов, теоретические основы технологии и опыт ее применения в научной деятельности. На конкретном примере рассмотрена актуальность применения метода, дана оценка с технологической и технико-экономической точки зрения.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Общие понятия о слабых грунтах и методе глубинной стабилизации	7
1.1 Слабые грунты в основании автомобильных дорог и последствия их воздействия на сооружение в целом	7
1.2 Основы проектирования оснований на слабых грунтах	15
1.3 Понятие процесса глубинной стабилизации грунтов	20
1.4 Виды укрепляющих материалов и предварительный подбор	28
1.5 Актуальность стабилизации слабых грунтов в суровых климатических условиях Сибири.	46
2 Исследования в области укрепления слабых грунтов методом глубинной стабилизации.....	53
2.1 Методы исследования характеристик грунтовых композиций	53
2.2 Анализ результатов исследований в области укрепления слабых грунтов методом глубинной стабилизации	58
2.3 Опыт применения метода.....	63
3. Технология производства работ по укреплению слабых грунтов основания автомобильных дорог методом глубинной стабилизации.....	67
3.1 Описание технологии стабилизации слабых грунтов	67
3.2 Подбор технологического процесса на конкретном примере.....	74
3.3 Сравнительный технологический анализ метода глубинной стабилизации с традиционным методом.....	82
3.4 Сравнительный технико-экономический анализ методов.....	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	93
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	95

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Сравнение технологических схем	99
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Локальный сметный расчет № 1 на земляное полотно устроенное традиционным методом с заменой слабого грунта.....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Локальный сметный расчет № 2 на земляное полотно устроенное с укреплением слабых грунтов методом глубинной стабилизации	102
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Статьи и публикации	104

ВВЕДЕНИЕ

Глубинная стабилизация как метод укрепления слабых грунтов является одним из технологических способов изменения и улучшения прочностных и физико-механических свойств грунтов с целью повышения несущей способности и устойчивости дорожных оснований автомобильных дорог.

Стоит отметить, что вопрос применения технологии глубинной стабилизации для укрепления слабых грунтов в основании автомобильных дорог не является новым. Но не зависимо от этого, до сих пор остается актуальным.

Несмотря на большое количество существующей литературы, посвященной укреплению слабых грунтов, недостатком является недостаточный объем нормативно-технической документации по правилам применения тех или иных добавок в процессе производства работ по стабилизации грунтов и недоказанность технологической и технико-экономической эффективности данного метода.

Основной целью исследовательской работы является обоснование укрепления слабых грунтов основания автомобильных дорог методом глубинной стабилизации и определение перспектив развития данной технологии в дорожно-строительной отрасли.

Для этого были сформулированы основные задачи научно-исследовательской работы, а именно: теоретическое изучение научных основ ранее проведенных исследований, проведение сравнительного анализа методов устройства основания на слабых грунтах, предварительный подбор стабилизирующих материалов, определение технологического процесса и оценка экономической эффективности технологии на конкретном примере.

Актуальность данного исследования заключается в следующем:

- Большая зона распространения слабых грунтов, в особенности переувлажненных глинистых грунтов в климатических условиях Сибири;

- Сверхнормативные нагрузки на автомобильные дороги в связи с высокой интенсивностью грузового движения и отсюда как итог – часто возникающие деформации;
- Значительное и эффективное улучшение характеристик и прочностных свойств слабых грунтов после укрепления;
- Снижение объемов работ за счет отсутствия необходимости в замене и последующей транспортировке грунта при производстве работ;
- Возможность использования в качестве укрепляющих материалов отходы промышленности, что позволяет высвободить огромные площади, занимаемые отходами и не используемые рационально;
- Снижение сроков и стоимости строительства.

В первой главе научной работы рассмотрены основные понятия о слабых грунтах и последствиях воздействия их на автомобильную дорогу, проведено сравнение различных технологий укрепления слабых грунтов, изучены виды стабилизирующих материалов и обоснована актуальность технологии укрепления слабых грунтов основания методом глубинной стабилизации в суровых природно-климатических условиях Сибири.

Вторая глава диссертации содержит в себе методологию проведения лабораторных исследований при стабилизации слабых грунтов, оценку ранее проведенных научных исследований и достижений в данной области, а также результаты, полученные при экспериментальных исследованиях.

В третьей части исследования рассмотрены различные технологии укрепления слабых грунтов методом глубинной стабилизации, проведен всесторонний анализ технологии на конкретно выбранном объекте (Енисейский район). Для данного объекта выбраны и обоснованы стабилизирующие материалы, рассмотрен технологический процесс производства работ на местности, проведена технологическая и экономическая оценка традиционного и рассматриваемого метода.

1 Общие понятия о слабых грунтах и методе глубинной стабилизации

1.1 Слабые грунты в основании автомобильных дорог и последствия их воздействия на сооружение в целом

Строительство автомобильных дорог относится к сложным технологическим процессам, на качество которых оказывает влияние множество факторов. Основными из них являются природно-климатические и грунтово-геологические условия. Большая часть площади Российской Федерации расположена в зоне с холодным и очень холодными климатическими условиями. Для таких зон характерны грунтовые основания отличающиеся болотными, заторфованными, переувлажненными грунтами, а также насыщенными глинами и суглинками с ледянистыми включениями. [1, 2]

Грунтовые слои различного состава и генезиса, которые в естественных условиях не получили достаточного уплотнения принято называть слабыми. К ним относятся водонасыщенные и сильносжимаемые грунты, которые при приложении нагрузок на основание теряют свои прочностные свойства, следовательно, уменьшается их сопротивление сдвигу, сцепление, возрастает сжимаемость. Но в условиях естественного залегания способны воспринимать медленно возрастающие нагрузки. Непосредственно на них возводить искусственные сооружения и автомобильные дороги нельзя. [1, 2]

С геологической точки зрения, по условиям образования и залегания эти грунты можно разбить на три группы: морские и озерные отложения образующие слоистые толщи (пески, супеси, суглинки, глины, органогенные и минеральные илы); покровные отложения, залегающие на плоских участках, на склонах и под склонами (торфяники, глинистый элювий коренных пород, размоченный лёсс, делювиальные отложения склонов); техногенные отложения, залегающие в форме бугров, терриконов или во впадинах рельефа, в оврагах, карьерах в форме карманов (отвалы промышленных отходов и т.п.). [3]

С физико-механической точки зрения, слабыми грунтами называют связные грунты, имеющие прочность на сдвиг в условиях природного залегания при испытании прибором вращательного среза менее 0,075 МПа, удельное сопротивление статическому зондированию конусом с углом при вершине $\alpha = 30^\circ$ менее 0,02 МПа или модуль осадки при нагрузке 0,25 МПа более 50 мм/м (модуль деформации ниже 5 МПа). При отсутствии данных испытаний к слабым грунтам следует относить: торф и заторфованные грунты, илы, сапропели, глинистые грунты с коэффициентом консистенции более 0,5, иольдиевые глины, грунты мокрых солончаков и т.д. [1]

К слабым так же относятся грунты, при использовании которых в качестве оснований насыпей даже минимально допустимом высоты необходимо учитывать в проекте возможность значительных деформаций основания в результате воздействия нагрузок от веса насыпи и транспорта. Слабые грунты обычно водонасыщены, имеют весьма высокую влажность ($\omega > \omega_L$), большую пористость и весьма большую сжимаемость; они чувствительны к воздействию вибрации и других факторов, связанных со строительным производством. [4]

Слабые грунты можно разделить на следующие типы:

а) органические слабые грунты (торфы, некоторые виды сапропелей и т.п.), содержащие более 60 % по весу органических веществ;

б) органо-минеральные слабые грунты (заторфованные глины, заторфованные илы и т.п.), содержащие от 10 до 60 % органических веществ;

в) минеральные слабые грунты (илы, иольдиевые глины, переувлажненные глинистые грунты, грунты мокрых солончаков и т.п.), содержащие менее 10 % органических включений. [4]

Торф –это органогенная осадочная порода, формирующаяся в результате отмирания болотной растительности при избыточном количестве влаги и недостаточном доступе воздуха.

Торф обладает высокой влагоёмкостью и влажностью в естественном состоянии (в пределах 150 - 1000 %). Твердое вещество высушенного торфа

состоит из не полностью разложившихся растительных остатков (растительного волокна, продуктов разложения растительных остатков), тёмного бесструктурного вещества и неорганических примесей. Волокнистая часть торфа при достаточном ее содержании может образовывать своеобразный структурный каркас, ячейки которого заполнены аморфной массой из продуктов разложения и неорганических примесей. Механические свойства торфов зависят от их структурных особенностей, определяемых степенью волокнистости, плотностью, влажностью и составом торфо-образователей (зольности торфа). При зольности менее 5 % состав торфо-образователей соответствует условиям формирования верхового болота. Торф в этом случае следует называть малозольным (верховым). При зольности от 5 до 20 % состав торфо-образователей соответствует условиям формирования низинного болота и торф следует называть средней зольности (низинным). При зольности 20 - 40 % торф следует относить к высокозольным (минерализованным). [1]

Сапропелями называют озерные отложения, образующиеся в водоемах в результате отмирания животных и растительных организмов, и оседания минеральных частиц, заносимых водой и ветром. Сапропелевые отложения могут быть в текучем пластичном, полутвердом и твердом состоянии. [4]

Болотный мергель представляет собой рыхлую осадочную породу, образовавшуюся в озерно-болотных условиях при поступлении в водоемы воды, содержащей в растворенном виде кислый углекислый кальций $\text{Ca}(\text{HCO}_3)$. Болотный мергель может подстилать торфяную толщу или переслаиваться с торфяными пластами. Мергель содержит от 25 до 50 % карбоната кальция. Остальная часть состоит из песчаных глинистых, илистых частиц и растительных остатков различной степени разложения.

Илы представляют собой глинистые горные породы в начальной стадии формирования, которые образовались в виде структурного осадка в воде при наличии микробиологических процессов и имеют в природном залегании влажность, превышающую влажность на границе текучести. Коэффициент пористости $e > 1$ для супесей и суглинков и $e > 1,5$ - для глин. Развитие в этих

грунтах микробиологических процессов, связанных с их органическими составляющими, является одним из важнейших факторов, отличающих илы от других слабых грунтов, содержащих не более 10 % органических веществ. Для илов характерно наличие предела структурной прочности на сжатии (при компрессии). Они могут быть трех видов: морские, озерные и аллювиальные. [1]

Иольдиевые глины - особая разновидность морских илов ледникового возраста. Верхние слои иольдиевых глин, которые обычно имеют мощность 0,3 - 2 м отличаются сравнительно высокой плотностью и прикрывают нижележащую толщу отложений, характеризующихся высокой влажностью (> 60 %), резкой потерей прочности, малой упрочняемостью при уплотнении, низкой водопроницаемостью. Иольдиевые глины обладают пределом структурной прочности на сжатии. Они делятся на разновидности по относительной влажности.

Мокрые солончаки, относящиеся к минеральным слабым грунтам, отличаются от солончаков других типов избыточным увлажнением в течение всего года. Постоянному их переувлажнению способствует близкий уровень минерализованных грунтовых вод; увеличенный приток поверхностных вод, обусловленный расположением мокрых солончаков в понижениях рельефа; слабая испаряемость воды из солевых растворов. Основные характеристики механических свойств мокрых солончаков при одном и том же составе, отражаемом числом пластичности, хорошо коррелируются с коэффициентом консистенции независимо от содержания солей. [1, 4]

Переувлажненные глинистые грунты (супеси, суглинки, глины) так же могут относиться к слабым. Они могут быть различного возраста, но обязательно имеющие в природном состоянии повышенную влажность. При этой влажности грунты имеют показатель текучести $I_L > 0,5$. По степени пластичности (текучести) они делятся на мягко пластичные ($I_L = 0,5 - 0,75$), текуче пластичные ($I_L = 0,75 - 1,00$) и текучие ($I_L > 1$).

Естественные основания относятся к слабым, если в пределах их слабой толщи имеются слои переувлажнённых глинистых грунтов мощностью, равной или более 0,5 метра. Все конструктивные и технологические решения в подобных случаях разрабатывают и осуществляют, как для насыпей на слабых грунтах.

Наряду с органоминеральными сапропелями имеется целая группа грунтов, представляющих собой переходную стадию от органических к минеральным. Свойства этих грунтов зависят от содержания органических веществ и по мере увеличения содержания органики свойства их меняются от характерных для минеральных слабых грунтов (илов, глин и т.п.) до свойств высокозольных торфов. Механические свойства органоминеральных грунтов в значительной степени зависят от условий формирования породы. Чаще всего органоминеральные грунты встречаются на переходах через поймы рек, староречья и т.п. В этих условиях минеральная часть грунта обычно имеет аллювиальное происхождение. Органоминеральные грунты могут перекрываться слоями минеральных или органических грунтов, или переслаиваться с ними в соответствии со сменой условий осадконакопления. В связи с указанными особенностями эти грунты могут иметь широкий диапазон изменения состава, плотности, следовательно, прочности и сжимаемости.

Чрезвычайное разнообразие условий формирования органоминеральных грунтов не позволяет дать их детальную строительную классификацию, включающую данные о физико-механических свойствах. Свойства подобных грунтов исследуют обычно применительно к некоторым региональным условиям. Классификацию органоминеральных грунтов следует строить по схеме: вид (по содержанию органики); подвид (по числу пластичности); разновидность (по показателю текучести). При этом целесообразно выделять три вида органоминеральных грунтов: торфянистый с содержанием органики от 60 до 30 %; сильно заторфованный с содержанием органики от 30 до 20 %; заторфованный с содержанием органики от 20 до 10 %. Внутри каждого вида выделяются четыре подвида по числу пластичности (супесь, суглинок, тощая

глина, жирная глина), которые делятся на пять разновидностей по состоянию текучести. [1, 4]

Слабые грунты, независимо от разновидности, значительно влияют на надежность дорожных конструкций в целом. Влияние таких свойств слабых грунтов, как водонасыщенность, высокая влажность, большая пористость и сжимаемость приводит как к деформациям земляного полотна, так и основания. [2]

На местности в резко-континентальном климате с продолжительным периодом низких температур и длительным периодом таяния снега возникают особо сложные условия для эксплуатации автомобильной дороги. Под воздействием воды и низких температур в основании со слабыми переувлажненными грунтами возникают ледяные образования, процессы постоянного увлажнения грунтов и попеременное промерзание – оттаивание, которые нарушают физические свойства и структуру грунта.

Воздействие климата на слабые грунты в сочетании с высокими и зачастую с ненормативными нагрузками от проезжающего по автомобильной дороге тяжеловесного транспорта необратимо воздействуют на состояние автомобильной дороги. Происходит превышение нагрузки над несущей способностью автомобильной дороги. Учитывая данные факторы, мы получаем целый комплекс причин возникновения деформаций в конструкции земляного полотна автомобильной дороги.

В земляном полотне со слабыми грунтами, которое работает в условиях постоянного и переменного воздействия сверхнормативных нагрузок от подвижного состава, а также в условиях сурового климата, могут проявляться общие и локальные деформации по принципу двух предельных состояний. [5]

Первая группа предельных состояний вызвана потерей несущей способности или устойчивости. Здесь характерны такие деформации, как:

- 1) Потеря устойчивости земляного полотна в пределах конфигурации сооружения (расползание насыпи);

- 2) Потеря устойчивости земляного полотна с выпором слабого грунта (или выдавливанием его из-под подошвы насыпи);
- 3) Потеря устойчивости откосов с последующим оползанием (низкое удельное сцепление и угол внутреннего трения);
- 4) Осадки и просадки земляного полотна и основания;
- 5) Сползание насыпи (при наличии косогора) и т.д.

Земляное полотно, подвергаясь таким деформациям, приходит в полную непригодность для эксплуатации.

Вторая группа предельных состояний вызвана потерей прочности слабого грунтового массива земляного полотна и остаточными или упругими деформациями. В данном случае характерными деформациями будут являться:

- 1) Осадка основания без изменения геометрических параметров автомобильной дороги, не превышающая предельную осадку (вертикальное перемещение грунтового массива);
- 2) Проявление видимых деформаций в покрытии проезжей части как результат деформаций земляного полотна (трещины, проломы, выбоины, колеи, пучинистость, и т.д.).

Данные деформации нарушают нормальную эксплуатацию земляного полотна и требуют незамедлительного устранения.

Все это, безусловно, влияет на долговечность сооружения, прочностные характеристики и эксплуатационные свойства.

Спрогнозировать точную работу конструкции земляного полотна со слабыми грунтами в процессе эксплуатации очень сложно, потому что она будет зависеть от постоянно меняющихся факторов, таких как осевые нагрузки, интенсивность движения, климатические характеристики, режим увлажнения, физико-механические свойства грунта. [2]

Для оценки устойчивости земляного полотна и отдельных его элементов используются расчетные схемы, основанные на анализе часто наблюдающихся в натуре разрушений и деформаций.

Общая устойчивость насыпи оказывается обеспеченной в том случае, если сумма всех сил, сдвигающих массив обрушения (или их моментов относительно оси вращения) оказывается меньше суммы сил (или их моментов), его удерживающих, что выражается критерием: $k_p \geq k_n$, где k_p , k_n – расчётный и нормативный коэффициент устойчивости соответственно. [5]

Высокая прочность основания позволяет увеличить срок межремонтной эксплуатации дороги. Устойчивость же основания напрямую влияет на ровность дорожного покрытия. Установлено, что при недостаточной устойчивости оснований, даже при хорошем уплотнении, высокая ровность быстро утрачивается. Технология стабилизации и укрепления грунтов позволяет достичь стабильных физико-механических показателей грунтов в основаниях, а также резко повысить их прочность и устойчивость.

1.2 Основы проектирования оснований на слабых грунтах

В основу проектных решений на местности, где имеются слабые грунты может быть положен один из двух принципов:

1) удаление слабого грунта с последующей его заменой или применение специальных инженерных сооружений (эстакад, путепроводов и т.д.);

2) использование существующего слабого грунта в качестве основания насыпи с применением специальных мероприятий по укреплению и стабилизации таких грунтов, в последствии чего, способных обеспечить устойчивость основания и ускорить его осадку, а также обеспечить прочность дорожной одежды, сооружаемой на таком земляном полотне.

Проектные решения по конструкции и возведению насыпи в таком случае рассматриваются индивидуально и выбираются на основе технико-экономического сравнения вариантов с учетом следующих факторов:

- геометрических параметров автомобильной дороги и технической категории;
- классификации проектируемой дорожной одежды;
- типа поперечного профиля (требуемой высоты насыпи);
- наличие и качества имеющегося для ее отсыпки грунта;
- протяженности участка со слабыми грунтами;
- вида и особенностей свойств слабых грунтов, а также особенностей строения слабой толщи (мощность слоя, наличие слоистости, грунтовых вод, многолетней мерзлоты и т. д.);
- условий производства работ с учетом сроков завершения строительства, климата района, времени года, в которое будут выполняться земляные работы, дальности транспортировки грунта, возможностей строительной организации (обеспеченность транспортом, наличие специального оборудования и т. п.). [1]

Отказ от того или иного принципа должен быть обоснован и подтвержден технико-экономическим анализом. Кроме того, анализ включает в себя прогноз

устойчивости насыпи, длительность осадки слабой толщи и ее конечной величины.

Для обеспечения долговечности земляное полотно на участках со слабыми грунтами проектируют в виде насыпей. Требования к грунтам верхней части насыпи (рабочего слоя), и необходимое минимальное возвышение низа дорожной одежды над расчетным уровнем поверхностных и грунтовых вод определены действующим нормативными документами в зависимости от типа местности по характеру увлажнения. [6]

К земляному полотну, возводимому с использованием слабых грунтов в основании насыпи, кроме общих требований, изложенных в действующих нормативных документах, предъявляются дополнительные:

- необходимо исключить возможность деформаций и выдавливания слабого грунта из-под насыпи в процессе ее возведения и эксплуатации т.е. обеспечить устойчивость основания;

- для стабилизации необходимо, чтобы интенсивная часть осадки завершилась до начала работ по устройству покрытия;

- упругие колебания земляного полотна, не должны превышать величину, допускаемую для принятого типа покрытия.

На насыпях автомобильных дорог, в основании которых слабые грунты не заменяются на другие, а укрепляются, покрытия капитального типа устраивают только после завершения как минимум 90 % расчетной осадки, а также, при условии, что средняя интенсивность осадки не превышает 2 см/год за месяц до возведения капитальных покрытий. [2, 7]

Для участков, где использование слабых грунтов представляется целесообразным по итогам технико-экономического анализа, на первом этапе принимают предварительное решение, которое затем подлежит уточнению при разработке рабочей и проектной документации. В особых случаях со сложными геологическими и природно-климатическими условиями предусматриваются индивидуальные обследования и экспериментальные работы для окончательного обоснования.

Проектирование земляного полотна на участках со слабыми грунтами производят в следующем порядке:

- 1) Определение по результатам инженерно-геологических обследований рабочих участков, характеристик грунтов и параметров слабой толщи;
- 2) Расчет минимально допустимой высоты насыпи по условиям водно-теплого режима, снегозаносимости и типа местности по характеру увлажнения;
- 3) Нанесение красных линий и определение типов поперечного профиля с учетом расчетной высоты насыпи;
- 4) Расчет величины осадки;
- 5) Проверка устойчивости основания;
- 6) Прогнозирование сроков завершения осадки;
- 7) Принятие в случае необходимости конструктивно-технологических решений для повышения устойчивости, ускорения осадки или снижения ее величины;
- 8) Сравнение вариантов стабилизации слабых грунтов и выбор оптимального;
- 9) Определение наиболее рациональной технологии производства работ на местности и составление технологической карты;
- 10) Наблюдение за процессом строительства и (в случае необходимости) внесение изменений в расчеты по фактическим данным с целью уточнения объемов земляных работ, режима возведения насыпи, сроков устройства дорожной одежды и т. д.

В соответствии с СП 34.13330.2012 при проектировании земляного полотна на участках залегания слабых грунтов могут применяться индивидуальные решения, а также индивидуальная привязка типовых решений при соответствующих обоснованиях. [6]

Индивидуальное проектирование земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах предусматривает:

1) Назначение геометрических параметров насыпи с учетом обеспечения её устойчивости, исключения недопустимых деформаций и интенсивности в случае полного или частичного сохранения слабых грунтов в основании;

2) назначение дополнительных мероприятий для обеспечения этих условий и принятие соответствующих технологических регламентов.

Для принятия решений по конструкции насыпи на слабом основании необходимо проведение инженерных изысканий, в процессе которого осуществляются оценка физико-механических свойств грунтов слабой толщи, определение типа слабого основания по устойчивости, предварительное обоснование необходимости удаления или сохранения слабых грунтов в основании насыпи, прогноз осадки насыпи (конечной и во времени).

При обосновании проектного решения и технологических регламентов необходимо учитывать реальные условия строительства (требуемые сроки и время года строительства, возможности обеспечения соответствующей техникой, опыт проведения тех или иных работ строительной организацией и др.). [1]

Проектирование оснований по методу применения существующих слабых грунтов по сравнению с методом замены слабого грунта имеет ряд преимуществ и недостатков.

Применение метода укрепления слабых грунтов в основании во многих случаях существенно снижает стоимость и трудоемкость работ, повышает темпы строительства, а также не требует использования дорогостоящих дорожно-строительных материалов, техники и технологий для их замены. Данный метод особенно рационален при большой мощности слабой толщи и протяженности участка со слабыми грунтами, так как заменить слабые грунты в таком случае довольно проблематично. Кроме того, значительным преимуществом при выборе метода проектирования может стать условия производства работ (дальность перевозки, климат района).

Недостатками можно считать необходимость в более подробном и длительном проведении инженерных изысканий, изучений свойств слабых

грунтов и экспериментальные исследования. Кроме того, появляется необходимость в специализированной технике для выполнения укрепления слабых грунтов и их стабилизации. Недостаток опыта в данной области зачастую является проблемой как для проектирования, так и осуществления данного метода в процессе производства работ.

Несмотря на вышеперечисленные недостатки, можно сделать вывод, что при грамотном, тщательном и правильном проектировании оснований на слабых грунтах высока вероятность не только повысить устойчивость конструкции земляного полотна, но и сократить стоимость и трудоемкость работ.

Стабилизацию слабых грунтов по методу глубинного смешивания следует проектировать и выполнять так, чтобы в процессе стабилизации грунт оставался пригодным для того вида применения, для которого он предназначен, и выдерживал бы все виды воздействия, которые могут возникнуть на участке стабилизации. Проводить ее следует до необходимой степени надежности и экономически выгодными способами. Для этого необходимо обеспечить, чтобы стабилизированный грунт отвечал самым высоким требованиям к прочности и эксплуатационной надежности.

1.3 Понятие процесса глубинной стабилизации грунтов

Согласно СТО СРО 083-029EN-2011 глубинная стабилизация представляет собой метод укрепления слабых грунтов путем добавления сухих, влажных или комплексных (органических или неорганических) вяжущих материалов способных связывать грунт и образовывать прочные камнеподобные массивы, которые при этом позволяют ослабить усадку, увеличить несущую способность, устойчивость и прочность слабого грунта. [2, 8]

Глубинная стабилизация является гибким методом укрепления грунтов и может применяться практически во всех областях строительства, в особенности в дорожном строительстве, в качестве метода укрепления естественного грунта, основания и конструктивных слоев дорожной одежды автомобильных дорог. Область применения данного метода представлена на рисунке 1. [9]



Рисунок 1 – Область применения метода глубинной стабилизации

Выделяют три основных способа глубинной стабилизации:

1. Укрепление слабых грунтов путем формирования колонн из стабилизированного грунта - «стабилизация колоннами» - чаще всего в

практике применяется при необходимости стабилизации небольшой протяженности участка автомобильной дороги со слабыми грунтами. Например, метод рационален при усилении грунта под малыми искусственными сооружениями или при прохождении участка автомобильной дороги через небольшие по площади, но глубокие болота, торфяные участки. Так же применяется при мощности слабого грунта более 5 метров (может быть до 25 метров);

2. Укрепление объема грунта по всей заданной площади - «стабилизация массивом»

- Укрепление на полную глубину залегания слабого грунта - применяется, когда мощность слабого грунта не превышает 5 м, и слабая толща, по технико-экономическим соображениям, может быть полностью, до плотных слоев, укреплена вяжущими материалами;

- Укрепление на неполную мощность - применяется, как правило, когда слабые грунты, оставшиеся не укрепленными, не относятся к основаниям III типа, и их процесс консолидации под весом насыпи может завершиться в период строительства;

3. Комбинированный метод с использованием стабилизации и массивом, и колоннами - применяется, когда слабые грунты, оставшиеся не укрепленными, имеют значительную мощность, и их устойчивость и требуемая скорость консолидации могут быть обеспечены с помощью свай из укрепленных грунтов (вариант комбинированной конструкции).

Применение метода стабилизации массивом или колоннами зависит от множества факторов (толщины и свойств слабого грунта, наличия оборудования, категории дороги и т.д.) и может выполняться различными способами. [8, 10]

На рисунке 2 приведено несколько вариантов расположения колонн на местности. На рисунке 3 показаны некоторые рекомендуемые нормативными документами варианты применения стабилизации колоннами. [8]

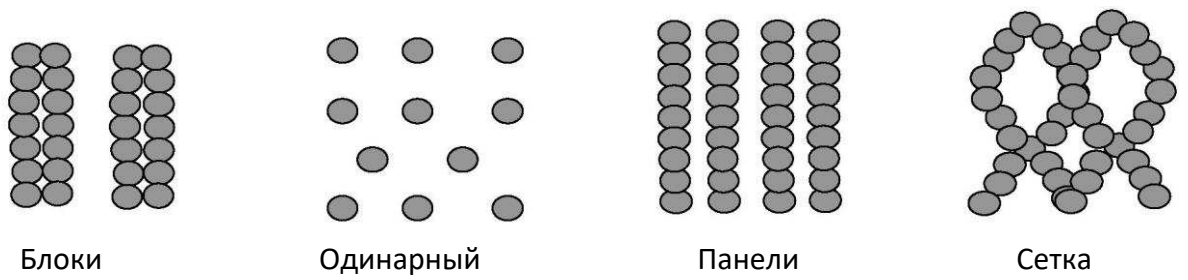


Рисунок 2 - Варианты расположения колонн на местности

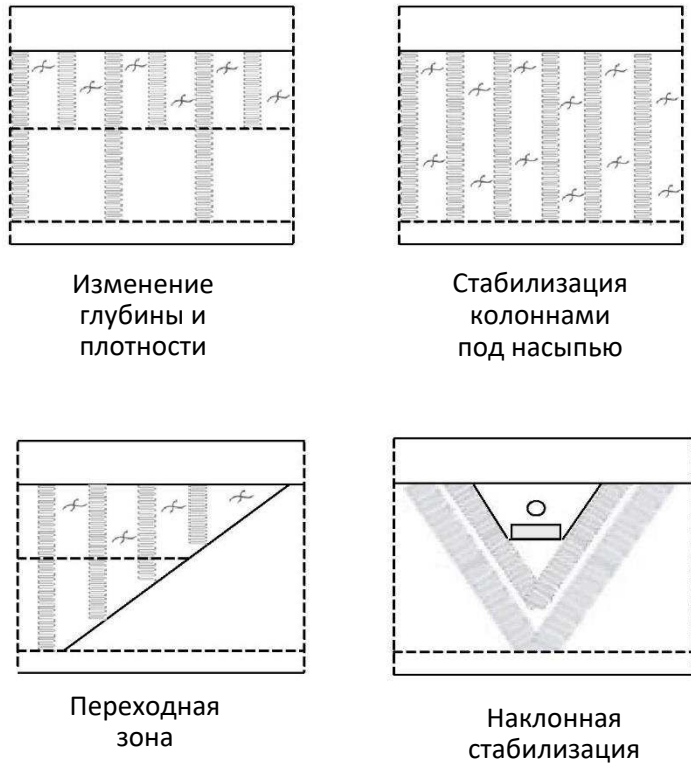


Рисунок 3 - Варианты применения стабилизации колоннами.

Пример комбинированного метода стабилизации представлен на рисунке 4.



Рисунок 4 - Изображение структуры, объединяющей в себе стабилизацию колоннами и массивом.

Проанализировав наиболее известные методы укрепления оснований и сравнив их с методом глубинной стабилизации, можно выделить при этом следующие основные преимущества и недостатки, приведенные в таблице 1. [2]

Таблица 1 – Преимущества и недостатки методов укрепления оснований автомобильных дорог

№	Методы укрепления основания автомобильных дорог	Преимущества	Недостатки
1	Глубинная стабилизация слабых грунтов в основании	<ul style="list-style-type: none"> - Экономичность использования - Гибкость применения метода - Экономия материалов и энергоресурсов - Нет необходимости в транспортировке в связи с использованием местного грунта - Нулевая выработка грунта - Высокая производительность работ и сокращение сроков строительства - Значительное улучшение свойств грунтов - Экологически чистый метод - Возможность использования отходов промышленности 	<ul style="list-style-type: none"> - Необходимо время для набора устойчивости насыпи - Не всегда применима для высоких насыпей - Не подходит для грунтов, слабо поддающихся стабилизации - Невозможность использования стабилизации колоннами в вечно-мерзлой зоне распространения грунтов - Потребность в специализированном оборудовании
2	Замена слабого грунта основания	<ul style="list-style-type: none"> - Более выгодный метод при наличии в основании небольших объемов слабого грунта 	<ul style="list-style-type: none"> - Значительно большой расход грунтовых масс - Негативно влияет на окружающую среду - Большой объем земляных работ - Необходимость в транспортировке грунта - Увеличение сроков строительства насыпи
3	Устройство свай	<ul style="list-style-type: none"> - Высокая надежность сооружения за счет устройства фундамента на большую глубину - Сокращение сроков возведения насыпи - Нет необходимости в транспортировке грунта 	<ul style="list-style-type: none"> - Более дорогостоящий метод - Вероятность проявления осадки окружающего грунта в процессе эксплуатации - Не актуален при большой протяженности участка дороги - Свойства грунтов не

			изменяются
4	Устройство вертикальных дрен	- Экономичность - Осушение основание за счет ускоренной консолидации	- Требуется больших затрат времени - Увеличенный расход грунтовых масс - Недостаточный набор устойчивости насыпи - Значительные усадки в ходе эксплуатации объекта - Нецелесообразно применять в плотных глинистых грунтах
5	Применение легких насыпей	- Экономичность метода	- Целесообразно при небольшой протяженности участка - Большой объем земляных работ - Проектная надежность ниже чем у других методов - Применяются на дорогах низких категорий

Итак, рассмотрев основные методы укрепления слабых грунтов основания автомобильных дорог можно сделать вывод, что глубинная стабилизация обладает большими преимуществами перед другими методами и является более современным и эффективным способом стабилизации грунтов в основании. [2]

По итогам проведенного анализа, можно сформировать следующие основные цели глубинной стабилизации грунтов:

1) Увеличение прочностных характеристик слабого грунта для обеспечения стабильной работы насыпи в процессе эксплуатации и увеличения несущей способности сооружения;

2) Снижение количества активных нагрузок и предотвращение разжижения;

3) Укрепление деформационных свойств слабого грунта (статических нагрузок) с целью уменьшения усадки, что позволит сократить время для усадки насыпи и уменьшить горизонтальные смещения;

4) Увеличение динамической жесткости слабого грунта для уменьшения передачи вибрационного воздействия на основание насыпи, окружающие участки и сооружения;

5) Повышение гидрофобизации в случаях с переувлажненными грунтами;

6) Обеспечение проектной надежности сооружения;

7) Очистка загрязненной почвы (грунта).

Технология глубинного смешивания является специальным конструктивно-технологическим мероприятием, предназначенным для обеспечения устойчивости насыпей, требуемых сроков консолидации их оснований, сложенных слабыми органическими, органоминеральными и имеющими повышенную влажность грунтами. В результате использования такой технологии достигается увеличение физико-механических свойств слабого грунта, как правило, в несколько раз. [8]

Технология глубинной стабилизации слабых грунтов в дорожном строительстве может быть использована в следующей области применения:

- обеспечение устойчивости насыпи и уменьшение сроков для достижения требуемой степени консолидации слабых грунтов в основании насыпи высотой до 7 м при мощности слоя слабого грунта от 3 м при строительстве автомобильных дорог;

- выполнение работ по расширению земляного полотна при реконструкции или капитальном ремонте автомобильной дороги в условиях распространения слабых грунтов;

- укрепление слабых грунтов в зонах расположения больших и малых водопропускных сооружений, элементов обустройства автомобильных дорог и т.д.

- инженерная подготовка территории с целью создания технологического слоя, обеспечивающего работу дорожно-строительной техники, временного проезда транспортных средств;

- переработка слабого, вывозимого в отвал грунта, получаемого при разработке выемок, для последующего его применения в качестве заполнителя при укреплении глубинным смешиванием в массиве органических грунтов или использования в нижней части насыпей.

Технология глубинной стабилизации подразумевает смешивание вяжущего материала, подаваемого под давлением со слабым грунтом на месте производства работ по всей ширине насыпи на всю глубину распространения грунтов или ее часть. В зависимости от вида вяжущего и его состояния различают сухое и влажное смешивание. Учитывая, что слабые грунты, как правило, имеют повышенную влажность, то предпочтительным является применение сухого смешивания.

На стабилизацию грунтов всех слоев дорожного грунта изобретён способ, который зарегистрирован патентом. [11]

Данный патент относится к дорожному строительству и может быть использован для стабилизации грунтов при возведении оснований автомобильных дорог и других сооружений. Способ гидрофобизации и стабилизации грунтов всех слоев дорожного грунта заключается в профилировании, последующей нарезке грунта грунтовой фрезой, последующим перемешиванием грунта фрезой с добавлением цемента, обработкой грунтоцементной смеси гидрофобизатором на основе природного минерала монтмориллонита, перешивании фрезой обработанной грунтоцементной смеси, уплотнении тяжелыми виброкатками до максимального уплотнения и последующем открытии движения, причем состав для стабилизации грунта содержит воду, цемент и минеральную добавку, в качестве минеральной добавки вводится концентрат монтмориллонита, причем массовая доля воды является варьируемой величиной в зависимости от влажности почвы. Технический результат заключается в укреплении грунта, как в качестве основного дорожного покрытия, так и в качестве основания при строительстве асфальтового дорожного покрытия, а также в получении более высокого уровня качества готового объекта строительства при применении и соблюдении данной технологии. [11]

Кроме того, изобретено специальное устройство для стабилизации грунтов вяжущими материалами. [12]

Устройство для стабилизации грунтов вяжущими материалами включает транспортное средство, поворотную платформу с буровым оборудованием и системой управления подачей буросмесителя, цементно-смесительный блок с приемным бункером с системой пневмозагрузки, дозатором цемента, предохранительной сеткой, с мешалкой, а также с резервуаром для воды, включающим дозирующее устройство, выполненным из двух камер, каждая из которых соединена через дозирующее устройство с мешалкой, блок подачи вяжущего материала с расходной емкостью, с напорным трубопроводом стрех ходовым краном и системой управления подачей вяжущего материала. Контрольно-регулирующая аппаратура снабжена прямой и обратной связью между датчиками влажности и давления, установленными в нижней части лопастей буросмесителя, и рабочими механизмами устройства. Установка снабжена скоростным смесителем и весовым дозатором, а также инклинометрами, установленными на раме транспортного средства и мачте.

Технический результат заключается в повышении качества, надежности и производительности стабилизации слабых естественных грунтов, обеспечении автоматизированного контроля процесса производства работ. [12]

1.4 Виды укрепляющих материалов и предварительный подбор

Укрепление основания насыпи может выполняться одним материалом (стабилизатором), комбинированием нескольких видов (композитные составы), вяжущим в сочетании с активными материалами и инертными добавками. Вяжущие материалы бывают гидравлическими, т.е. самозатвердевающими в контакте с водой, или негидравлическими, т.е. требующими реакции для затвердевания. [2]

Стабилизатор – это материал, обладающий гидравлическими свойствами, и способный так или иначе изменять структуру грунтов, его свойства и характеристики. Стабилизатор может представлять собой смесь двух или более стабилизирующих материалов. Так же в целях экономии средств совместно с стабилизирующими материалами могут применяться специальные наполнители, такие как песок, кремнеземная пыль и т.д. [8]

Общая классификация стабилизаторов в дорожном строительстве в зависимости от структуры материала и физического состояния, согласно методическим рекомендациям имеет вид, представленный на рисунке 5. [13]

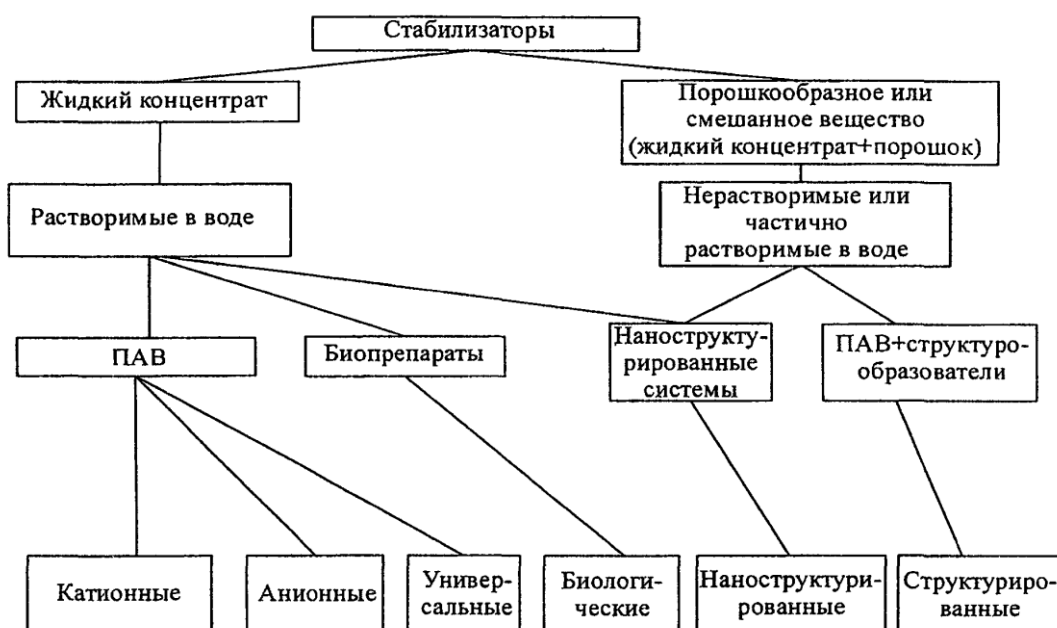


Рисунок 5 - Общая классификация стабилизаторов

Для выбора вида стабилизирующего укрепляющего материала проводятся инженерно-геологические изыскания местности, на основе которых должны быть получены данные по разновидности имеющихся на местности грунтов с учетом классификации слабых грунтов, параметры его состава и состояния. Так же для подбора стабилизатора определяются влажность, содержание пылеватых и глинистых частиц, содержание органических веществ и т.д.

Укрепление выполняется одним вяжущим материалом, комбинированием нескольких видов, вяжущим в сочетании с активными материалами и (или) инертными добавками. [2]

Вяжущие укрепляющие материалы могут быть гидравлическими, то есть самозатвердевающими в контакте с водой, или негидравлическими, то есть требующими реакции некоторой части материала для затвердевания. Негидравлические вяжущие материалы могут быть применены в целях активации «скрытых» гидравлических материалов для получения реакционно способных композитных составов. Гидравлический вяжущий материал позволяет стабилизировать практически любые типы грунтов, однако для предотвращения образования гетерогенного конечного продукта механическое смешивание вяжущего материала в грунте должно быть очень хорошим. Негидравлические вяжущие материалы обычно реагируют с глинистыми минералами в грунте, что приводит к образованию стабилизированного материала с улучшенными геотехническими свойствами. [8]

В качестве основных стабилизаторов могут быть использованы следующие неорганические (минеральные) материалы:

- 1) Цемент и его разновидности – является гидравлическим вяжущим материалом. При схватывании цемента грунт выполняет функцию клея. При этом также происходит некоторое высушивание грунта. Может достаточно хорошо стабилизировать любое грунтовое вещество, что было доказано опытами и практическим применением в ранее проведенных исследованиях.

Существует большое количество различных типов цемента. Как правило, применяется портландцемент или шлако-портландцемент для стабилизации. Цемент с мелкими гранулами более реакционноспособный по сравнению с цементом с крупными гранулами. В некоторые типы цемента могут добавляться различные присадки, такие как шлак, зола или гипс. При стабилизации нормативными документами рекомендуется применять цементы марки не ниже 300.

2) Известь - в виде жженой (CaO) или гашеной(Ca(OH)₂). Реакции происходят с минералами в грунте. Жженая известь при смешивании с грунтом вступает в реакцию с водой и образует гашеную известь. В результате данной реакции также выделяется тепло, которое способствует ускорению реакций и уменьшению содержания воды, т.е. происходит высушивание грунта (CaO + H₂O => Ca(OH)₂ + тепло). [25]

Цемент и известь являются распространенными материалами на современном рынке, и чаще всего проблем с закупкой данного материала не возникает. Так же существует большой выбор среди изготовителей и поставщиков данных материалов. Приблизительная стоимость 1 кг извести начинается от 12 руб.

3) Высокоактивные и активные молотые доменные шлаки – искусственные каменные массы, получающиеся в качестве отхода при процессе плавления различных металлов. Для смешивания должны применяться только в гранулированном и молотом виде, так как в ином виде достаточно сложно вызвать реакцию с грунтом. Поэтому чаще всего подвергаются механической обработке и дроблению. Чем мельче гранулы, тем более реакционно-способным будет шлак. Для получения более быстрой реакции доменные шлаки рационально применять вместе с цементом или известью. [44]

По своему химическому составу доменный шлак похож на цемент, однако количество и реакционная способность могут быть различными в зависимости от состава и используемой печи. Доменный шлак может рассматриваться как экономичная замена для цемента.

Рассматривая в качестве потенциального применения стабилизации грунтов в Красноярском крае, основными производителями шлаков здесь будут являться такие заводы и предприятия как Новоангарский обогатительный комбинат (НОК), Красноярский металлургический завод (КрАМЗ), Ачинский глиноземный комбинат, Красноярский алюминиевый завод, Красноярский завод цветных металлов и др. Поэтому, использование данного материала в качестве стабилизатора вполне возможно, приобрести который можно как от прямых поставщиков, так и от торговых компаний за цену от 100 руб./тонну.

4) Зола уноса - это мелкозернистый остаток процесса горения. Состав золы разнообразен и зависит от используемого топлива (торф, каменный уголь, биотопливо и т.д.) и процесса горения. Способность к реакции у золы так же разная и варьируется в широких диапазонах. Реактивными компонентами в золах являются SiO_2 и Al_2O_3 . Как правило, золы как самостоятельный стабилизатор имеют не очень высокую реактивную способность, однако они позволяют уменьшить стоимость комбинированного материала. [25]

Зола-уноса как результат горения каменного и бурого угля наиболее распространен в Красноярском крае. По приблизительным данным, в крае расположено около восьми ста различных котельных и теплоэлектростанций, которые используют в качестве горючего каменноугольные материалы Канско-Ачинского бассейна. Так же накоплены большие запасы зол-уноса, которые хранятся на золоотвалах. Например, реализацией золы-уноса в Красноярском крае на протяжении многих лет успешно занимается компания ООО «СибТехЭнерго». Продуктом является сухая мелкодисперсная высококальциевая зола-уноса, получаемая при высокотемпературном сжигании Канско-Ачинского бурого угля на "Березовской ГРЭС". Стоимость тонны здесь начинается от 800 руб./т.

5) Гипс строительный – применяется как в чистом виде, так и в виде инертного сульфата кальция. Марка гипса согласно нормативным документам должна быть не ниже Г10. Чаще всего имеет место в использовании композитных материалов.

Так же, как и цемент с известью, является довольно распространенным, но и дорогим строительным материалом.

б) Белитовые, нефелиновые и бокситовые шламы - являются отходами переработки нефелиновых и бокситовых руд при производстве глинозема. Представляют собой песко-образный продукт и используются без дополнительной переработки. При уплотнении во влажном состоянии белитовый шлам обладает способностью к консолидации в монолитный водостойкий материал и имеет способность к дальнейшему набору прочности во времени.

Крупнейшее в России предприятие по производству глинозёма - Ачинский глиноземный комбинат. Расположено в городе Ачинске Красноярского края. По приблизительным оценкам, на шламоотвале находится около 100 млн. тонн нефелинового шлама.

В качестве дополнительных стабилизаторов в комплексе с вышеупомянутыми материалами могут применяться такие, как:

1) Инертные добавки в виде местных связных переувлажненных грунтов, пылеватых песков, слабоактивных шлаков и т.д.

2) Обжиговая пыль может послужить примером побочного продукта в производстве извести. Это мелкозернистый материал, собираемый в фильтре из печных газов обжиговой печи.

3) Тонкая кремнеземная пыль является еще одним примером побочного продукта, который может использоваться в смесях. Это побочный продукт в производстве металлического кремния или ферро кремниевого сплава.

Указанные побочные материалы не стандартизируются, однако производители могут иметь собственные спецификации и инструкции по применению. Технические характеристики таких продуктов следует проверять в зависимости от ситуации для принятия решения об их применимости для процедуры стабилизации.

Для оптимизации технических характеристик и экономии средств при обработке грунта применение всех вышеуказанных материалов возможно, как отдельно, так и путем получения композиционных составов с различным процентным соотношением вяжущего и грунта. Композиционные составы могут производиться в заводских условиях или смешиваться на месте с использованием стабилизационного оборудования. [14, 44]

Однако технология укрепления слабых грунтов основания методом глубинной стабилизации с применением комплексных стабилизаторов требует индивидуального исследования и проектирования составов грунтовых композитов, разработки технологии использования с учетом физико-механических характеристик грунтов на объекте строительства и доступности сырьевой базы.

Помимо неорганических (минеральных) материалов в качестве стабилизаторов могут применяться и органические, которые чаще всего используются в комплексных составах для укрепления слабых грунтов.

К ним относятся жидкие битумы класса СГ и МГ, сланцевые битумы, дегти и битумные эмульсии. Но применение их в области укрепления слабых грунтов как самостоятельный стабилизатор весьма ограничена. По теоретическим предпосылкам, их применение нецелесообразно без внесения дополнительных добавок в виде минеральных материалов (цемент, известь, ПАВ и т.д.) т.к. зачастую слабые грунты имеют высокую влажность. Так же данные добавки редко используются по причине высокой стоимости и незначительной эффективности.

В таблице 2 рассмотрим другие инновационные добавки для стабилизации грунтов, которые были внесены в электронную базу данных, разработанную ООО «СПбГАСУ-Дорсервис» в рамках выполнения НИР на тему: «Создание базы данных расчетных характеристик материалов и грунтов с улучшенными характеристиками при проектировании нежестких дорожных одежд». [15]

Таблица 2 – Инновационные добавки для стабилизации грунтов

п/п	Стабилизатор	Изготовители	Краткое описание стабилизатора	Область применения
1	Полимерные эмульсии	ООО «Технопрок», ООО «Строительные Технологии Сибири» (г. Красноярск) и т.д.	Эффект стабилизации грунтов обусловлен распадом эмульсии (испарением из нее воды) и одновременным отверждением полимера	Для укрепления всех разновидностей крупнообломочных и песчаных грунтов, содержащих в своем составе пылеватые и глинистые частицы в количестве не менее 15% по массе. Не подходит для переувлажненных грунтов
2	Битумно-полимерные композиции (БПК)	ООО «Технопрок», ООО «Строительные Технологии Сибири» и т.д.	Является органическим вяжущим и эффективны в сочетании с минеральными вяжущими	Для укрепления связных грунтов, в том числе техногенных
3	Полифилизаторы «ПГСЖ — 1» «ПГСБ — 2»	ООО «МД-Системы», г. Москва, ООО Национальные ресурсы	Взаимодействие с грунтом происходит в результате химической реакции ионов внутри молекул грунта. После воздействия полифилизатора, структура молекул изменяется, а новые ионные связи отличаются повышенной прочностью. Обычно представлены в жидком виде	Применяются для стабилизации всех видов песчаных и глинистых грунтов
4	Чимстон – 1, Чимстон – 2	ООО Национальные ресурсы ООО «Завод Инновационного Промышленного Оборудования»	Является жидким гидрофобизирующим органически вяжущим. Расход добавки составляет от 0,01% от массы грунта. При этом используется совместно с цементом в количестве 1-5% от массы грунта или с другими неорганическими материалами.	Применяются для стабилизации всех видов песчаных и глинистых грунтов
5	Nicoflok	АзПроектСтрой и ООО «Никель» г. Санкт-	Полимерная добавка, работающая совместно с цементом, обеспечивает возрастание прочностных	Для всех типов грунтов, пригодных к укреплению цементом, для водонасыщенных

		Петербург	показателей и модуля упругости по сравнению с обычным цементогрунтом. Норма расхода порошка – 0,5-1% от массы грунта с цементом в количестве 5-10%.	грунтов
6	Добавка-стабилизатор «NanoSTAB»	ООО «ДорТехИнвест», г. Белгород.	Добавка на основе эмульсии. Чаще всего используется в качестве добавки к цементу. Эффект достигается путем распада эмульсии и отверждения полимера, за счет чего улучшается гидроизоляция грунта	Применяется на естественных грунтах с содержанием глины от 15%, на супесчаных, песчаных и крупнообломочных грунтах
7	Концентрат Полибонд	ООО «СуперРoad-сРус», г. Москва	Химическая жидкость, включающая ПАВ, серную кислоту и цитрусовое масло. Используется в качестве добавки к таким вяжущим как цемент, зола-уноса, шлаки и нефелиновые шламы.	Применяется для укрепления грунта рабочего слоя из песчаных и глинистых грунтов влажностью не более 55% и содержанием комков глины размером 10мм не более 10%.
8	Модификатор «RoadСem» или «ДорЦем ДС-1»	ООО Росиннотех, г. Санкт-Петербург. НПО «Металлургия – Геотехнология», г. Москва	Порошкообразная гидрофобизирующая добавка, состоящая из ПАВ, щелочноземельных металлов и цеолита. Имеет свойства гидравлического вяжущего и применяется вместе с цементом. Примерный расход – от 0,1% от массы грунта	Для укрепления всех типов грунтов. Более эффективна для песчаных грунтов.
9	Добавка «NovoCrete»	ООО "НовоКрете Системс Ист" г. Москва	Порошкообразное вещество на основе минералов. Используется совместно с цементом. Примерный расход составляет 0,1-0,5% от массы слабого грунта	Для устройства несущих и дополнительных слоев оснований из супесчаных, песчаных, крупнообломочных грунтов и техногенных грунтов
10	Стабилизатор «ANT»	ООО "АНТ-Инжиниринг . Волжский	Представляет собой водорастворимую активную органоминеральную добавку, содержащую ПАВ и микроэлементы. Применяется для укрепления совместно с 2-	Применяют во всех климатических зонах для стабилизации связных и глинистых грунтов

			5% содержанием цемента по массе грунта. Стабилизатора при этом необходимо 0,1-0,3%	
11	LBS — жидкий силикатно-полимерный стабилизатор грунта	«Polyroad», г. Юбилейный ООО «Парагон Групп» г. Москва	При внесении жидкого стабилизатора в грунт обеспечивается изменение физико-механических свойств грунта за счет химического воздействия и гидрофобизации. Рекомендуемый расход составляет 0,01-0,03% от массы обрабатываемого грунта и варьируется в зависимости от естественной влажности и типа грунта.	Применяются для стабилизации всех видов глинистых грунтов
12	Полимерный стабилизатор M10+50	«Polyroad», г. Юбилейный. ООО «Парагон Групп» г. Москва	Представляет собой многокомпонентное жидкое вяжущее на основе акрилового сополимера. Используется как индивидуально, так и с неорганическими вяжущими (напр. 6-10% цемента от массы грунта и 3-6 л/м ³ стабилизатора).	Применяются для стабилизации всех видов глинистых грунтов

Кроме рассмотренных в вышеприведенной таблице стабилизаторов, в отечественной и зарубежной практике укрепление грунтов производилось с применением других материалов, таких как Статус, Дорзин, Дортех, Маг-ГФ, Топ-сил, Roadbond, Roadzyme, ЕН-1, SPP, Perma-Zume, Consolid 444, Solidry, Conservex, Geostak-1, RoadpakerPlus, Terrastone, ECOroads, LDC+12, SoilBond и другие.

Все они так или иначе относятся к многокомпонентным химическим системам, представляющим собой мощные поверхностно-активные вещества, которые после введения в слабый грунт активно взаимодействуют с его пылевато-глинистыми частицами. В результате такого взаимодействия, обработанные стабилизаторами грунты, изменяют свои физико-механические свойства. Как результат такого взаимодействия – возникновение гидрофобизации, снижение влажности, отсутствие набухания и пучинистости,

повышение плотности и прочностных характеристик стабилизированного грунта. [16]

Одним из примеров композитного материала можно рассмотреть изобретённый и запатентованный состав для стабилизации природных и техногенных грунтов. Состав содержит, мас. %: меланин 0,01-0,5, формиат кальция 0,5-3,0, золу-унос 1,0-8,0, стекло натриевое 0,01-1,0, олеат натрия 0,01-0,5, лигносульфонат технический ЛСТ 0,1-1,0, доломитовую муку 0,5-3,0, известь гашеную 1,0-3,0, этилсиликонат натрия 0,01-0,5, активный микрокремнезём 0,01-0,1, метилсиликонат натрия 0,2-1,0, сульфаты натрия, аммония и железа 0,02-0,5, цемент 78-96,63. В качестве цемента используют цемент марки ПЦ 500 Д0 или ЦЕМ I 42,5Н. Технический результат при этом – повышение качества стабилизации грунта за счет снижения возможности образования в нем усадочных трещин, выбоин и участков, подверженных морозному пучению, повышение прочностных характеристик грунта. [17]

В области исследования проблемы стабилизации слабых грунтовых оснований насыпи необходим так же качественно-экономический анализ материалов, которые могут использоваться в качестве стабилизаторов для повышения прочностных свойств и характеристик земляного полотна.

Для предварительного подбора материала для стабилизации слабых грунтов в основании, необходимо провести оценку рациональности использования их в определенных природно-климатических условиях.

В качестве объекта исследования рассматриваются северные районы Сибири, Красноярского края. Обосновано это тем, что в данных районах чаще всего в основаниях автомобильных дорог встречаются слабые переувлажненные глинистые грунты, которые не пригодны для использования и поэтому в большинстве случаев заменяются на другие.

Чтобы провести анализ материалов с географической точки зрения, конкретизируем объект внедрения технологии укрепления слабых грунтов методом глубинной стабилизации на примере Енисейского района.

Для дорог здесь характерны повышенные и даже сверхнормативные нагрузки, обусловленные высокой интенсивностью движения грузовых автопоездов и лесовозов, поэтому как итог такого воздействия – различные дефекты и деформации автомобильной дороги. Так, в г. Лесосибирск базируется один из крупнейших в России комплексов переработки древесины, производитель пиломатериалов, древесноволокнистых плит АО «Лесосибирский ЛДК №1» который ежегодно перерабатывает свыше 1 млн кубометров круглого леса. Общая расчетная лесосека комбината составляет 2,9 млн. м³/год. Поэтому, применение технологии укрепления слабых грунтов основания автомобильных дорог методом глубинной стабилизации в данной местности будет особенно актуально. Стоит отметить и то, что в Енисейском районе есть перспектива развития дорожной сети в связи с имеющимися природными богатствами и ресурсами. Примером может служить проект строительства Высокогорского моста, который был включен в перечень инвестиционных проектов, реализуемых в составе комплексного инвестиционного проекта "Енисейская Сибирь". [18]

Проведем анализ и оценку возможности применения вышеприведенных стабилизаторов грунтов на конкретной местности – в Енисейском районе.

Цемент, его разновидности и известь относятся к материалам с высокой доступностью к приобретению и реализации, так как повсеместно используется в строительной отрасли, что является его несомненным преимуществом. Так же преимуществом является достаточное количество технической нормативной документации, которая регламентирует применение цемента и извести в качестве укрепляющих материалов для слабых грунтов. Свойства данных материалов, влияние на прочностные характеристики и технология производства работ так же обоснованы в ходе проведения экспериментальных исследований разными научными институтами и организациями.

Однако при использовании цемента и извести требуются большие экономические затраты. Для стабилизации переувлажненных грунтов (глины, супеси, суглинков) обычно требуется порядка 10% от массы слабого грунта.

Для повышения эффективности расход часто увеличивают до 15-20%. Средняя плотность глинистых грунтов – 1600 кг/м³. В 1 м² глубиной рабочего слоя 70 см содержится 1120 кг, значит для его стабилизации потребуется как минимум 112 кг цемента или извести. При стоимости 1 кг цемента в брус, необходимо будет потратить 672 рубля на поверхность слабого грунта площадью 1м².

Альтернативой применения дорогостоящего цемента и извести могут стать шлаки, золы уноса и, нефелиновые шламы, обладающие гидравлическими свойствами. Эти материалы являются неисчерпаемыми отходами теплоэнергетической и металлургической промышленности. [2]

С ужесточением экологических требований предъявляемые к организации и содержанию шламовых полей, утилизации и захоронению таких отходов вопрос их применения становится наиболее актуальным. Отрасль строительства автомобильных дорог является максимально материалоемким потребителем отходов промышленности, а применение их в качестве стабилизаторов позволяет расширить сырьевую базу, упростить технологический процесс производства работ, использовать местные грунты в качестве дорожно-строительного материала, существенно удешевить дорожное строительство и освободить площади, занимаемые отвалами и не используемые рационально. [2]

Так, для стабилизации грунта шламами, шлаками и золой уноса необходимо добавлять 25-30% от массы слабого грунта. То есть, для укрепления грунта на площади 1м² при глубине 0,7м потребуется 280-336 кг материала. Тогда на поверхность грунта площадью 1м² примерные экономические затраты по условно приведенным ценам составят: для доменного шлака – от 30 руб., для золы-уноса – от 224 руб., для нефелинового шлама – от 14 руб., что значительно меньше по сравнению с известью и цементом.

Но применение таких материалов в качестве стабилизаторов должно рассматриваться индивидуально с географической и геологической точки зрения, для каждого района проектирования глубинной стабилизации слабых

грунтов. Например, относительно г. Енисейска, ближайшие шламонакопители расположены на Ачинском глиноземном комбинате, который находится приблизительно в 450 км. Зола уноса в качестве материала для стабилизации можно найти в различных котельных, но если речь идет о массовой стабилизации грунта и больших объемах материала, то ближайшие золоотвалы находятся на теплоэлектростанциях в г. Красноярске, до которого порядка 300 км. Все это приводит к удорожанию применения данных материалов в качестве стабилизаторов, так как увеличиваются расходы за счет транспортировки. Кроме того, применение золы-уноса носит сезонный характер, потому как основной объем выработки приходится на зимний период года, когда строительство основания автомобильной дороги невозможно.

Применение доменных шлаков, получаемых в процессе переработки свинцовых и цинковых руд на Новоангарском обогатительном комбинате является более выгодной с позиции географического местоположения. Новоангарск находится в соседнем Енисейскому - Мотыгинском районе (порядка 50-100 км). Но в данном случае транспортировка материала затрудняется, так как в маршруте имеется паромная переправа, которая предъявляет требования к массе перевозимого груза.

Еще одной из проблем применения золо-шлаковых и шламовых материалов является их неоднородный состав и не всегда удовлетворительные условия хранения. Поэтому, такие отходы требуют дополнительных экономических и производственных затрат на их обработку.

Применение органических вяжущих, таких как битум, дёготь и битумная эмульсия в качестве самостоятельных стабилизаторов нецелесообразно по нескольким причинам. Во-первых, в природно-климатических условиях Сибири чаще всего встречаются глинистые грунты, которые уже имеют повышенную влажность, поэтому для стабилизации должен применяться сухой метод с использованием гидравлических вяжущих, которые при контакте с водой вступают в реакцию. Во-вторых, невыгодным их применение

оказывается и с экономической стороны в связи с высокой стоимостью материалов.

Рассмотрев так же в качестве используемых стабилизаторов инновационные добавки, можно отметить следующие общие недостатки их применения.

Недостатком является отсутствие или недостаточный объем нормативно-технической документации по правилам применения тех или иных добавок в процессе производства работ по стабилизации грунтов. По большинству стабилизаторов нет конкретизации в каком количестве необходимо применять тот или иной материал для грунтов с определенными характеристиками. Возникает проблема с пониманием характера воздействия стабилизатора на грунт и их химической совместимости.

При таком разнообразии стабилизаторов необходимо индивидуально рассматривать их свойства и прогнозировать, как исходный слабый грунт поведет себя в результате химической реакции. Этого можно добиться своевременным отбором проб слабого грунта и последующим исследованием его свойств на стадии проектирования и изыскания.

Не менее важно отметить то, что применение стабилизаторов зачастую требует наличие технологичного оборудования и современных дорожных машин, таких как ресайклеры, дозаторы, бортовые компьютеры и т.д. В западных городах страны укрепление грунтов современными стабилизаторами обычно выполняется специализированными в этой области дорожными организациями. В красноярском крае таких предприятий небольшое количество.

Еще одним недостатком является затраты на транспортировку необходимых материалов, ведь большинство из них изготавливаются все теми же специализированными предприятиями, которые находятся обычно в центральной и западной части Российской Федерации, чаще всего в Московской области, а также в зарубежных странах. Поэтому, необходимо

рассматривать стабилизаторы, применение которых имеет наименьший расход материала.

Но использование современных стабилизаторов так же имеет некоторые положительные стороны и отличия от традиционных материалов.

Разнообразие и индивидуальность позволяет выбрать такую добавку, способную улучшить свойства грунта в конкретных условиях. Например, в сложных условиях с большим количеством осадков и продолжительного весенне-осеннего периода для повышения водонепроницаемости существуют улучшенные гидрофобизирующие добавки (Дорцем, LBS, NanoSTAB и др.) которые предотвращают проникновение влаги и капиллярное поднятие воды в основание насыпи. При постоянно действующих сверхнормативных нагрузках на автомобильную дорогу для улучшения физико-механических свойств и понижения деформативности основания логичным видится применение жидких добавок (БПК, полифилизаторы, полибонд и др.) совместно с неорганическим вяжущим (цемент) для ускоренного набора прочности и повышения эффективности.

Так же инновационные добавки могут быть использованы с целью сокращения сроков строительства, что особенно актуально в Енисейском районе, т.к. в виду природно-климатических условий данной местности характерен короткий строительный период. Модифицированный состав добавок позволяет ускорить процесс стабилизации и достигнуть расчетную осадку насыпи в более короткие сроки.

Использование добавок в комплексных составах значительно уменьшает расход минеральных материалов. Если расход портландцемента для стабилизации без добавок составляет от 10 до 20% от массы грунта, то с добавлением добавок, таких как Чимстон, ANT и M10+50 расход уменьшается до 1-5 и 6-10% соответственно.

На основе вышеизложенного, можно сделать вывод, что в условиях Енисейского района не рационально использование жидких органических стабилизирующих добавок, таких как БПК, полимерные эмульсии,

полифилизаторы («ПГСЖ — 1», «ПГСБ — 2»), полибонди NanoSTAB, ввиду наличия в рабочем слое глинистых переувлажненных грунтов. В этом случае из-за высокого содержания влаги такие добавки становятся неэффективными.

Существуют и такие жидкие гидрофобизирующие добавки, которые являются исключением и могут применяться в переувлажненных глинистых грунтах вместе с неорганическим вяжущим (цемент, шлак, золы уноса и т.д.) т.к. имеют небольшой расход материалов. К ним можно отнести такие инновационные добавки как Чимстон, ANT, LBS и M10+50. Если в 1 м² глубиной рабочего слоя 70 см содержится 1120 кг слабого грунта, то для его стабилизации расход добавок составит: ANT– 1,12 – 3,36 кг; LBSи Чимстон– 1,12 – 5,6 кг; M10+50 – 3 – 6 кг. Однако при небольшом расходе, такие стабилизаторы имеют высокую стоимость. Например, по данным компании «Polyroad» стоимость добавок LBS и M10+50 варьируется от 10 до 11\$ за 1 литр, что в переводе на курс рубля составляет 644,4 – 708,4 руб. Поэтому, учитывая транспортировку материала, можно сказать что применение таких материалов является экономически невыгодным, т.к. превышает даже стоимость стабилизации грунта цементом. [19]

Наиболее предпочтительным с физической точки зрения в данном случае является использование порошкообразных добавок: Nicoflok, Дорцем, и их аналогов.

Стоимость добавки Nicoflok по ТССЦ (101-6000) без НДС на 2019 год составляет 93000 руб. за тонну материала. При расходе 0,5-1% от массы слабого грунта потребуется 5,6 - 11,2 кг или 520,8 – 1041,6 руб. Причем данную добавку рекомендуется использовать совместно с цементом (5-10%), что значительно повышает стоимость.

Добавка дорцем по приведенным данным НПО «Металлургия-Геотехнология» добавляется в количестве 0,1-0,2% (3,2кг/м³) от массы грунта с цементом составляет около 280 руб./кг. Для стабилизации глинистого грунта (плотностью 1600кг/м³) в рабочем слое толщиной 0,7м потребуется 1,12 - 2,24 кг или 313,6 – 627,2 руб. Применение данной добавки наиболее выгодно по

сравнению с другими добавками с экономической точки зрения. Однако ее недостатком является то, что стандартами регламентируется применение только совместно с цементом. Если расход цемента при применении данной добавки уменьшается до 5%, то потребуется 56 кг цемента (336руб). Общая стоимость такого комплексного вяжущего составит как минимум 650 руб. на м² глинистого грунта при толщине слоя 0,7м, что примерно сопоставимо применению портландцемента в чистом виде в качестве стабилизатора, без учета транспортных расходов. Использование комплексного вяжущего так же способно увеличить перспективную экономию за счет сокращения сроков строительства и более эффективного улучшения физико-механических свойств грунта.

Итак, отметим основные **выводы**.

Использование тех или иных стабилизаторов необходимо планировать индивидуально исходя из геологических и географических данных района проектирования, разновидности слабого грунта и его физико-механических свойств. Рекомендуется произвести выбор стабилизатора опытно-экспериментальным путем.

Предварительно можно сказать, что для рассматриваемой местности, а именно Енисейского района и слабого переувлажненного глинистого грунта мощностью слоя 70 см необходимо исключить использование органических жидких вяжущих и добавок.

Из отходов промышленности в качестве стабилизирующего материала в Енисейском районе рационально применять имеющие наименьшую стоимость нефелиновые шламы Ачинского Глиноземного Комбината, при этом транспортировку инертного материала возможно осуществлять железнодорожным транспортом.

Рассмотренные современные добавки имеют достаточно высокую стоимость и даже при низком расходе стабилизатора их применение окажется невыгодным с экономической точки зрения, особенно при использовании в качестве неорганического материала разновидности цемента.

Но применение таких добавок, которые способны в комплексе с шламовыми отходами вступать в активную реакцию, позволит уменьшить расход минеральной части материала. А следственно, уменьшится необходимый для укрепления грунтов объем шламового стабилизатора и количество грузоперевозок в случае необходимости.

Результаты анализа добавок и материалов для последующего предварительного подбора стабилизатора сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Анализ и предварительный подбор стабилизатора

№	Стабилизатор	Примерная стоимость материала	Минимальный расход в % от объема грунта	Стоимость с учетом расхода на 1м ² (при слое слабого грунта = 0,7 м)
1	Цемент и его разновидности	6 000 руб/т	10%	672 руб
2	Известь	12 000 руб/т	10%	1344 руб
3	Шлаки и ЗШО	100 руб/т	25%	30 руб
4	Золы уноса	800 руб/т	25%	224 руб
5	Нефелиновые шламы	50 руб/т	25%	15 руб
6	Инновационные добавки	От 19 500 руб/т	Варьируется для разных добавок от 5 до 20%	От 1092 руб Применение жидких добавок часто (в зависимости от грунта) не целесообразно

Данная таблица наглядно показывает, что стоимость отходов промышленности (шлаков, зол и шламов) по сравнению с другими стабилизаторами намного ниже. И даже учитывая больший потребный расход материалов для стабилизации, их применение оказывается экономически выгоднее.

1.5 Актуальность стабилизации слабых грунтов в суровых климатических условиях Сибири.

Метод укрепления грунтов путем стабилизации на сегодняшний день рассматривается как один из современных и потенциальных методов для повышения проницаемости и укрепления деформационных свойств грунтов. Современный опыт использования технологии позволяет говорить о том, что различные органические почвы могут быть достаточно эффективно укреплены стабилизаторами. Укрепление таких грунтов, как органическая переувлажненная глина, торф, ил, приводило к достаточно позитивным результатам. Современные добавки и стабилизаторы грунтов уже на протяжении многих лет успешно применяются в зарубежных странах, таких как США, Германии, Голландии, ЮАР, Австралии, Канаде и т.д. [20]

В статье «Международные тематические исследования по стабилизации грунтов методом глубинного смешивания» приведены современные и успешные примеры использования данной технологии в разных условиях и разных странах, таких как Германия, Япония, Дания и Польша. По итогам статьи сделаны общие выводы и даны рекомендации по применению стабилизации слабых грунтов. [21]

Опыт применения технологии глубинной стабилизации грунтов есть и в России. Уже сейчас некоторые российские современные дорожные компании имеют собственное оборудование и успешно выполняют проекты по стабилизации грунтов.

Расширяется и обновляется нормативная база по данной технологии. В 2011 году в России был разработан ОДМ 218.1.004 «Классификация стабилизаторов грунтов в дорожном строительстве». Он учитывает накопленный отечественный и зарубежный опыт использования различных химических добавок и вяжущих и позволяет более эффективно применять данный метод. В 2015 году Федеральным дорожным агентством был опубликован ОДМ 218.2.063-2015 – «Рекомендации по применению технологии

глубинного смешивания для укрепления слабых грунтов оснований земляного полотна». Данный нормативный документ описывает методику применения технологии глубинной стабилизации грунтов в России при строительстве автомобильных дорог. [13, 14]

Зачастую проектируемые трассы проходят через территории с распространением слабых грунтов и в этом случае в процессе производства работ чаще всего используют традиционные методы укрепления, такие как замена слабого грунта на материалы из сырьевых баз (щебень, гравий, пгс и т.д.), лежневые настилы (на дорогах низких категорий), дорожные одежды из щебня и т.д. Но использование технологии глубинной стабилизации грунта в таких условиях, позволяет не использовать привозной материал и отказаться от утилизации слабых грунтов, что в свою очередь оказывается дешевле и быстрее классических методов укрепления.

Так же благодаря применению метода стабилизации, возможно дополнительно сократить затраты на строительство за счет увеличенной прочности, эластичности, морозостойкости и водостойкости, следовательно, и толщины дорожной конструкции. При этом технико-экономические расчеты, проведенные экспертами на основе фактических производственных затрат и строительных сроков, показывают, что применение в дорожных конструкциях слоев из укрепленных местных грунтов, вместо использования привозных инертных материалов, приводит к снижению стоимости строительства на 10–30%. [16]

В Красноярском крае также, как и в других регионах Сибири, данная технология укрепления слабых грунтов в особенности актуальна.

Во-первых, зона распространения слабых грунтов, в особенности переувлажненных глинистых, в Сибири довольно большая ввиду природно-климатических условий, большого обилия осадков и перепада температур. Все это значительно влияет на водно-тепловой режим в весенне-осенний период года. Сибирь согласно строительной климатологии характеризуется коротким периодом производства строительного-монтажных работ по сравнению с другими

регионами страны ввиду своих природно-климатических условий и поэтому применение стабилизации рационально так же в целях сокращения сроков строительства. [2, 22]

Во-вторых, применение технологии глубинного смешивания по сравнению с другими методами более эффективно (табл. 1). Стабилизация значительно повышает деформационные и прочностные свойства слабых грунтов. В данном случае пропадает необходимость в замене и транспортировке слабого грунта на дальние расстояния, что снижает трудоемкость работ, так как в Сибири часто встречаются места с большой протяженностью и глубиной залегания слабой толщи. Все это снижает стоимость и повышает производительность работ. Так же ранее проведенными научными исследованиями доказано, что стабилизированный слабый грунт в полной степени способен заменить основания из прочных материалов.

В-третьих, автомобильные дороги Сибири работают в очень жестких природно-климатических условиях, где характерны повышенные и даже сверхнормативные нагрузки, обусловленные высокой интенсивностью движения грузовых автопоездов и лесовозов, поэтому как итог такого воздействия – возникновение различных дефектов и деформаций автомобильных дорог. Например, в г. Лесосибирск базируется один из крупнейших в России комплексов переработки древесины, АО «Лесосибирский ЛДК №1» который ежегодно перерабатывает свыше 1 млн кубометров круглого леса для дальнейшей транспортировки. Общая расчетная лесосека комбината составляет 2,9 млн. м³/год. Кроме того, в связи с высоким богатством Сибири природными ресурсами существует хорошая перспектива развития дорожной сети в разных направлениях.

В-четвертых, в Сибири достаточно большие запасы материалов, которые могут применяться как стабилизирующие. Альтернативой применения дорогостоящего цемента и извести могут стать шламы, шлаки и золы уноса. Как известно, энергетической основой Красноярска являются три угольных ТЭЦ, производящих 80 процентов потребляемого краевым центром тепла и

дающих весомый вклад в краевую энергосистему по производству электрической энергии. Но при сгорании угля образуются большие объёмы золошлаковых отходов (ЗШО). Несмотря на то, что ЗШО относятся к пятому классу опасности, что означает практически неопасные, золоотвалы занимают огромные территории, которые можно было бы использовать более эффективно. По информации института экологии и географии СФУ, в настоящее время масса золошлаков в России колоссальна: только в границах Красноярска находится три шламонакопителя и пять золошлакоотвалов. [23]

Так, в Красноярском крае количество теплоэлектростанций и котельных - 796 единиц, на которых ежегодно сжигается 14,4 млн. тонн углей Канско-Ачинского бассейна. При сжигании углей образуется 906,4 тыс. тонн в год золошлаковых отходов, которые размещаются на 297 объектах, включая 21 золоотвал. Утилизации подвергаются только 98,9 тыс. т в год золошлаковых отходов. [24]

На рисунках 6 - 9 представлены схемы расположения крупнейших в Красноярском крае отвалов отходов промышленности Ачинского глиноземного комбината, Новоангарского обогатительного комбината и Березовской ГРЭС.

Как видно по схемам, площадь поверхности, занятой отвалами колоссальная и насчитывает 4,8 км² для нефелинового шлама, 2,2 км² для шлаков и около 1,3 км² для золы-уноса, что в общей площади составляет примерно 1/2 площади железнодорожного района г. Красноярска. И это лишь малая часть от общего количества отвалов в Сибири.

Поверхность: 4787683 метры² | 4.788 километры² |



Рисунок 6 – Отвал Ачинского глиноземного комбината



Рисунок 7 – фото отвала Ачинского глиноземного комбината

Поверхность: 2161055 метры² | 2.161 километры² |



Рисунок 8 – Отвал Новоангарского обогатительного комбината

Поверхность: 1333162 метры² | 1.333 километры² |



Рисунок 9 – Отвал Березовской ГРЭС

С ужесточением экологических требований предъявляемые к организации и содержанию шламовых полей, утилизации и захоронению таких отходов вопрос их применения становится наиболее актуальным. Отрасль строительства автомобильных дорог является максимально материалоемким потребителем отходов промышленности, а применение их в качестве стабилизаторов в дорожном строительстве расширяет сырьевую базу и упрощает некоторые технологические процессы. [2] Широкое применение отходов промышленности в виде золы-уноса, шлаков и шламов позволяет:

- использовать местные грунты в качестве дорожно-строительного материала в сочетании с вышеуказанными отходами промышленности, что существенно удешевляет дорожное строительство;
- высвободить огромные площади, занимаемые отвалами золы, шламов и шлаков, которые не используются рационально. [2]

Создание материалов для стабилизации и упрочнения местных грунтов с возможностью их использования при сооружении земляного полотна и основания дорожной одежды отнесено к разряду приоритетных согласно «Концепции национальной программы модернизации и развития автомобильных дорог Российской Федерации до 2025 года», утвержденной в

2004 г. В связи с этим особое значение приобретает использование различных производственных отходов.

Реализация технологии укрепления слабых грунтов основания автомобильных дорог методом глубинной стабилизации может найти свое применение в строительномонтажных работах по ремонту, капитальному ремонту, реконструкции и строительстве автомобильных дорог при условии наличия в проектной документации объемных работ по земляному полотну.

Например, заинтересованы в применении данной технологии могут быть организации, выполняющие работы по строительству и ремонту автомобильных дорог, управления краевых и федеральных автомобильных дорог, дорожно-строительные предприятия Красноярского края, Новосибирской и Иркутской области, и других регионов Российской Федерации, которые можно отнести к II–V дорожно-климатической зоне с повсеместным распространением слабых грунтов, природно-климатические условия которых можно охарактеризовать как суровые.

Помимо вышеизложенного, стоит отметить, что в данный момент укрепление слабых грунтов основания методом глубинного смешивания в Красноярском крае и других регионах Сибири повсеместно не применяется. Но по примеру западных стран и европейской части России можно уверенно сказать, что опыт применения данной технологии положительный.

2 Исследования в области укрепления слабых грунтов методом глубинной стабилизации

2.1 Методы исследования характеристик грунтовых композиций

Характеристики слабых грунтов после стабилизации зависят от используемого для укрепления стабилизатора, его количества, а также физико-механических и химических свойств самого грунта. Данные свойства могут значительно изменяться во времени и при этом не могут быть точно спрогнозированы на основании свойств естественного грунта, подлежащего укреплению, в связи с чем требования к свойствам грунта, должны быть соблюдены на основе обязательного выполнения экспериментальных исследований. [25]

Отбор и подготовка образцов, хранение и испытания по определению физико-механических свойств слабых грунтов и стабилизаторов, проводятся в соответствии с нормативно-технической документацией. В качестве базовых документов приняты ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик» [26], ГОСТ 30416-2012 «Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения» [27] и ГОСТ 12248-2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости». [28]

Лабораторные исследования укрепленного грунта могут быть выполнены в следующем порядке [25]:

- в процессе проведения полевой части инженерно-геологических исследований производится отбор образцов по глубине толщи слабого грунта из всех характерных ее инженерно-геологических элементов (ИГЭ);

- определение физико-механических свойств, взятых образцов слабого грунта, что позволяет получить общее представление о мощности слоев грунта в слабой толще и сориентироваться в выборе стабилизатора (тип вяжущего и его количество);

- укрепление путем смешивания отобранных образцов слабого грунта со стабилизатором в различном их сочетании и объеме при природной влажности с последующей выдержкой в течение 28 и 90 дней;

- проведение испытаний с образцами из грунтовых композиций после укрепления для определения прочности при одноосном или трехосном сжатии, водопроницаемости, водонасыщения и других свойств. [25]

Испытания укрепленных образцов грунта проводятся с целью подбора наиболее эффективного и оптимального количества (объема) стабилизатора и оценки характера роста прочности укрепленного грунта во времени. [25]

Необходимое время выдержки укрепленных образцов различно в зависимости от состава смесей вяжущего материала и грунта. Химические реакции в результате укрепления грунта цементом практически полностью заканчиваются в течение первого месяца. Если в качестве стабилизатора использовались смеси, содержащие известь, шлам, шлак или золы уноса, процесс набора прочности укрепленных грунтов может занять несколько месяцев. Время выдержки выявляется в процессе лабораторных испытаний образцов укрепленного грунта и сравнения результатов их прочности после одного, двух и трех месяцев. Полученные результаты позволяют провести оценку эффективности того или иного вяжущего. [25]

Выявленная по результатам исследования прочность на сжатие образца грунта, укрепленного в лабораторных условиях, оказывается обычно выше, чем прочность такого же грунта, но укрепленного на реальном объекте. Это объясняется тем, что в лабораторных условиях смешивание проводится более эффективно и качественно, а образцы не подвержены климатическим условиям, т.е. хранятся при стабильной температуре и влажности воздуха. [25]

Окончательный выбор типа и количества стабилизатора, а также уточнение физико-механических характеристик укрепленных слабых грунтов рекомендуется проводить по результатам пробного укрепления слабых оснований на конкретном экспериментальном объекте.

Исследуемые характеристики и методы их определения должны подбираться в зависимости от природно-климатических условий местности, типа слабых грунтов, категории и класса автомобильной дороги.

Методика рекомендуемых испытаний основных характеристик слабых грунтов и грунтовых композитов в соответствии с нормативно-технической документацией представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Методы определения характеристик

№	Характеристика грунтовых композитов	Метод определения	Область применения
1	Масса образцов	Инструментально, с помощью весов	Слабые грунты, стабилизатор, грунтовые композиты
2	Плотность грунта	Расчетным путем, режущим кольцом, взвешиванием в нейтральной жидкости	Слабые грунты, стабилизатор, грунтовые композиты
3	Влажность	Высушивание до постоянной массы (сушильный шкаф)	Слабые грунты, стабилизатор, грунтовые композиты
4	Предел прочности на сжатие	Одноосное сжатие (определение после 7, 28 и 90 суток твердения)	Слабые грунты, грунтовые композиты
5	Предел прочности на растяжение при изгибе	Гидравлический пресс	Грунтовые композиты
6	Морозостойкость	С помощью прессы после попеременного замораживания и оттаивания	Грунтовые композиты
7	Теплопроводность	Стационарным тепловым потоком	Грунтовые композиты
8	Водопроницаемость	При постоянном градиенте напора	Грунтовые композиты
9	Водонасыщение	Водяная ванна	Грунтовые композиты

Перечисленные в таблице 4 характеристики и методы их определения могут подбираться индивидуально для каждого грунтового композита, исходя из конкретных условий местности и исходных данных объекта проектирования.

Для сравнения эффективности применяемого стабилизатора, следует проводить испытания с образцами грунта, отобранных из разной глубины

слабой толщи. Так же следует учитывать различное количество стабилизатора по соотношению к объему образцов грунта.

Основываясь на полученных значениях после проведения испытаний, используя структуру таблицы 5 можно осуществить подбор оптимального стабилизатора и его количество. При этом, в таблице могут быть сравнены любые характеристики, при разных сочетаниях и количества стабилизатора.

Таблица 5 – Пример структуры таблицы для подбора стабилизатора

№	Грунтовый композит	Влажность, %			Предел прочности на сжатие, МПа		
		Количество стабилизатора от объема слабого грунта			Количество стабилизатора от объема слабого грунта		
		10%	15%	30%	10%	15%	30%
1	Грунт+цемент: - 7 сут. - 28 сут. - 90 сут.						
2	Грунт+шлам: - 7 сут. - 28 сут. - 90 сут.						
n	...						

Занесенные в таблицу 5 данные испытаний анализируют и сравнивают, составляют графики зависимости, после чего окончательно определяется оптимальный стабилизирующий материал и его количество.

При смешивании слабых грунтов со стабилизирующими материалами на молекулярном уровне возникают следующие взаимодействия:

- химические – возникают в процессе гидратация частиц стабилизатора (цемента, извести, шлама и т.д.), с частицами природных или искусственных грунтов и особенно с тонкодисперсной их частью;

- физико-химические - обменное поглощение катионов или поглощение других катионо- или анионоактивных веществ; при этом может возникать молекулярная сорбция веществ, а также необратимая коагуляция глинистых и коллоидных частиц, т.е. их прочное цементирование;

- физические и механические - равномерное объединение частиц вяжущего с частицами слабого грунта, достижение оптимального увлажнения и максимального уплотнения смеси с последующим обеспечением твердения.
[29]

При этом, при использовании разных стабилизаторов, характер их взаимодействия со слабыми грунтами будет выражаться по-разному. Можно сказать, что большое разнообразие стабилизаторов, пригодных для укрепления грунтов требует тщательного и внимательного подхода при их выборе.

2.2 Анализ результатов исследований в области укрепления слабых грунтов методом глубинной стабилизации

На данный момент, научными деятелями и учеными накоплена довольно большая база теоретических предпосылок и научных исследований в области укрепления слабых грунтов основания автомобильных дорог методом глубинной стабилизации. По данной тематике существует целый ряд утвержденной нормативно-технической документации. [1, 4, 8, 14, 30, 31]

Неоднократно проводились лабораторные и экспериментальные исследования, при этом некоторые из них были проверены в практическом применении на экспериментальных объектах. По итогам большинства исследований были отмечены положительные результаты испытаний на прочность и деформируемость, доказана эффективность стабилизации.

Так, проанализировав научную статью на тему «Применение технологии глубинного смешивания в массиве для укрепления слабых грунтов оснований насыпей автомобильных дорог» (ФГУП «РОСДОРНИИ») можно выделить следующие особенности. [32]

В качестве стабилизирующих материалов приняты известь и цемент, использование которых, на практике, в большом количестве в условиях Сибири не целесообразно экономически. По данным анализа цен в г. Красноярске, стоимость цемента марки ПЦ 400 варьируется от 300 до 400 руб. за 50 кг, т.е. 1 кг обойдется как минимум в 6 руб. При этом, в указанной статье минимальный расход вяжущего составляет 120 кг/м². Это значит, для того что бы укрепить 1 квадратный метр слабого грунта необходимо потратить 120 кг цемента или 720 руб. В том случае, когда в процессе производства работ необходимо укрепить огромные площади на достаточно большой протяженности, потребуются большие экономические затраты.

Так же в данной статье приводится опыт применения метода глубинной стабилизации массивом на слабом торфяном основании. Как правило, торф значительно отличается по своей структуре от других слабых грунтов

(например, ил или переувлажненной глинистой почвы), при этом выводы сделаны и для других разновидностей. Однако, каждый отдельный слабый грунт при его укреплении, требует индивидуального подхода и проектирования. [1, 32]

В другой научной статье рассматривался опыт проектирования и строительства земляного полотна на слабых грунтах в Пермском крае. В качестве укрепления принят метод устройства грунтоцементных свай «jet-grouting», который по своей технологии имеет много общего с методом глубинной стабилизации колоннами. В данном случае так же в качестве стабилизатора принят цемент, о котором уже было сказано выше. В качестве укрепляемого основания послужил слабый переувлажненный глинистый грунт. [33]

Данная технология применена в Пермском крае на участке длиной около 20 километров федеральной автомобильной дороги «Пермь – Екатеринбург» категории IА «Магистраль». Данный участок введен в эксплуатацию в 2014 году, поэтому опыт применения можно считать успешным.

В научной статье «Стабилизация грунта неорганическими вяжущими» в качестве стабилизаторов рассматривались шлакощелочные вяжущие «Граунд». Данный стабилизатор состоит из шлака (80-94%), щелочного активатора (4-7%), вулканического пепла (2-9%) и активной добавки ЛСТ-М (0-2%). Суглинки и супеси согласно статье укреплялись добавлением 25% шлака с увлажнением водой до оптимальной влажности и после этого уплотнялись под разной нагрузкой (1, 2, 5, 10, 20, 40 МПа). Тем самым было достигнуто повышение плотности исследуемых грунтов, что привело к повышению оптимальной влажности и прочности практически в два раза. [34]

Анализируя данную статью можно сделать вывод о том, что для укрепления рассматриваются суглинистые и супесчаные грунты, которые в соответствии с первой главой диссертации не относятся к слабым и для стабилизации для достижения оптимальной влажности таких грунтов использовалась вода. Однако применение такой добавки в районах с резко-

континентальным климатом будет носить индивидуальный характер. Это связано с тем, что грунты в таких условиях часто переувлажнены и являются слабыми ввиду больших осадков, температурного режима и наличия мерзлых грунтов. В данном случае предпочтительным является применение сухого смешивания для стабилизации.

Опыт применения технологии глубинного смешивания в массиве для укрепления слабых грунтов основания насыпей автомобильных дорог был применен в 2013 г. в опытно-экспериментальных целях на двух участках дорог, прилегающих к трассе строящейся автомагистрали Москва – Санкт-Петербург (Тверская область). В процессе работ применялись различные варианты укрепления цементом с применением оборудования финской фирмы ALLU. При этом варьировали расход цемента, а также объем добавляемого в торф местного грунта (как правило, переувлажненный слабый грунт, получаемый при разработке выемок). Полученные результаты обследования свидетельствуют о существенном (на порядок) снижении деформативности дорожного основания. [32]

Более подробно укрепление слабых грунтов рассмотрено в научной работе под названием «Усиление глинистых грунтов шлаковым вяжущим». Следует отметить, что в данной работе рассматривается метод исследования свойств грунтов не только испытанием на одноосное сжатие, но и на трехосное осе симметричное сжатие, что безусловно является правильным решением, т.к. в условиях эксплуатации земляное полотно и основание насыпи подвергается различным видам нагрузок и по нормативным документам проектирование ведется в условиях общей прочности, на сопротивление на растяжение при изгибе, сопротивление сдвигу, дренирование, морозоустойчивость и т.д. Так же в данной работе рассматриваются приборы и методика для проведения испытаний. По результатам работы проверена зависимость осевой деформации от вертикального давления для глиношлаковой смеси. [35]

Особенно интересной и актуальной является научная работа к.т.н. Бескровного В. М., где в качестве стабилизатора для укрепления слабых грунтов

в условиях Сибири было рассмотрено шламонепелиновое вяжущее. В процессе научного исследования были изучены его состав и свойства, а также подобран оптимальный состав смеси для грунтов с разным гранулометрическим составом. Кроме того, в данной научной работе исследования проводились на опытном строительстве в 1977-1981 году на автомобильной дороге Новосибирск – Кемерово – Красноярск. Шламонепелиновое вяжущее применялось совместно с грунтом для устройства нижних слоев основания на опытном участке автомобильной дороги. По результатам эксперимента отмечено положительное влияние на прочность, влажность и морозостойкость грунтов, укрепленных шламонепелиновыми вяжущими. Повторные испытания на опытном участке доказали, что основания устроенные по методу стабилизации с использованием непелинового шлама не имеют усадочных трещин и мало подвержены трещинообразованию от действий переменных температур. Кроме того, наблюдался постепенный набор прочности такого основания. [36]

По итогам данной работы был утвержден документ: «Методические рекомендации по применению непелинового шлама Ачинского глиноземного комбината при устройстве оснований автомобильных дорог в районах Западной и Восточной Сибири». В дальнейшем рекомендации были использованы при строительстве в Красноярском крае 32 км автомобильных дорог и при проектировании еще 10 км автомобильной дороги с общим экономическим эффектом 351 тыс. рублей. [30, 36]

Так же в выпускной квалификационной работе Я.В. Еремеева под руководством Н.А. Артемьевой было рассмотрено применение непелинового шлама в строительстве автомобильных дорог и перспективы использования. Результаты лабораторных испытаний показали, что прочность непелинового шлама на 28 сутки оказалась больше, чем у испытуемых образцов на 7 сутки. Это говорит о том, что непелиновый шлам имеет свойство набора прочности в течении определенного времени. В данной работе так же были проведены испытания на теплопроводность, которые доказали, что шлам обладает

меньшей теплопроводностью чем песок, что положительно влияет на свойства дорожных оснований. [37]

Проблеме укрепления грунтов различными вяжущими посвящены работы многих других ученых и деятелей. Но особо следует отметить большую теоретическую и практическую ценность для дорожного строительства исследовательских работ, выполненных д-ром геол.-минералог, наук, проф. В.М. Безруком и его учениками. Тогда был разработан первый отечественный нормативный документ на укрепленные грунты СН 25-74 «Инструкция по применению грунтов, укрепленных вяжущими материалами, для устройства оснований и покрытий автомобильных дорог и аэродромов». [29, 38, 39]

Основываясь на проведенном анализе научных исследований в области укрепления слабых грунтов основания методом глубинной стабилизации можно сделать вывод, что данный метод является высокоэффективным с точки зрения улучшения свойств и характеристик исходных материалов при условии технико-экономического обоснования данной технологии. Внесение стабилизаторов в слабый грунт снижает влажность и повышает плотность основания, позволяет увеличить прочность и модуль упругости, а также благоприятно влияет на теплопроводность и водонасыщение.

2.3 Опыт применения метода

Используя анализ результатов исследования, представим практический опыт применения метода глубинной стабилизации для укрепления слабых грунтов основания автомобильной дороги в таблице 6.

Таблица 6 – Опыт применения метода глубинной стабилизации в России

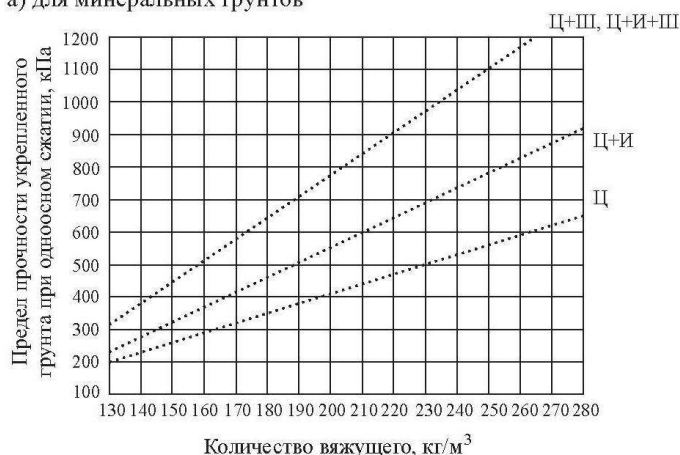
№	Наименование автомобильной дороги, организация	Описание	Период строительства	Применяемые материалы	Результат
1	Новосибирск-Кемерово-Красноярск Союздорнии	Укреплено 500 метров дорожного основания из пылеватой глины	1977-1981	Шлам+цемент (11-17%)	Подтверждена возможность получения в производственных условиях высоких показателей физико-механических свойств основания (I и II класс прочности)
2	Тарутино – Близневка, Союздорнии	Методом смешивания укреплено и в общей сложности построено 19 км дороги	1977-1981	Пгс+шлам (25%); Шлам+цемент (12%)	При эксплуатации автомобильной дороги деформаций ц/б покрытия не обнаружено
3	Обход г. Ачинска, «Союздорпроект»	Укрепление верхнего слоя земляного полотна на участке длиной 10км	1979-1983	Уплотненный слой шлама (15 см)	Доказано, что нефелиновый шлам обладает хорошей деформативностью и трещиностойкостью
4	Алтай-Кузбасс, Алтайавтодор	Отсыпка слоев земляного полотна	1999-2002	Зола-уноса	Доказано, что качество золошлаковых отходов позволяет применять их в дорожном строительстве
5	г. Москва, Аэропорт Шереметьево	Обработка слабого грунта навесной фрезой	2006	Ионный стабилизатор зарубежного производства T-RRP на кислотной основе	Доказано, что внесение стабилизатора снижает величину оптимальной влажности грунта и способствует повышению плотности слоя на 5-10%. Использование стабилизатора позволяет увеличить прочность и модуль упругости, уменьшить водонасыщение грунта
6	г. Орехово-	Укрепление	2006	полимерная	Доказана эффективность

	Зуево	минеральных грунтов (переувлажненный слой песка пылеватого)		эмульсия М10+50 + цемент (10%)	для данного типа грунта. Повышение прочности и плотности грунта, снижение расходов минерального вяжущего.
7	Красноярск – Железногорск КГКУ «Крудор»	Приготовленную дорожную смесь транспортировал и на место работ и укладывали равномерным слоем	2012	Щебень+шлам+гипсоангидрит	Доказано улучшение прочностных свойств дорожных оснований с применением шламовых вяжущих
8	Москва-Санкт-Петербург, ООО «НордСтэбРаша», «Росдорнии»	Укреплено естественное основание из слабых переувлажненных грунтов (глины и торф)	2013	Цемент (25-40% %) Цемент+песок	Снижение деформативности дорожного основания, даны рекомендации по подбору стабилизатора
9	«Няндомашестиозерский» ОАО «Няндомское ДУ»	Укрепление грунтового покрытия автомобильной дороги IV категории	2013	Цемент+современный стабилизатор АНТ	Доказана эффективность стабилизатора, технологические операции проведены успешно
10	«Пермь – Екатеринбург»	Укрепление глинистых водонасыщенных грунтов на участке длиной 5 км	2014	Грунтоцементные сваи глубиной 4-6 м	В процессе стабилизации наблюдалась равномерная осадка земляного полотна. Участок дороги на сегодняшний день находится в эксплуатации
11	Обход г. Красноярск, КГКУ «Крудор»	Укрепление основания дорожных одежд	2020 - н.в.	Нефелиновый шлам	В данный момент ведутся дорожные работы

Представленный в таблице 6 экспериментальный опыт позволяет сделать вывод о том, что технология стабилизации слабых грунтов далеко не инновационная. Практически во всех случаях был отмечен положительный эффект использования данной технологии.

На основе обобщения полученных и приведенных экспериментальных данных по глубинному смешиванию грунтов научно-исследовательским институтом «Росдорнии» были составлены графики зависимости предела прочности укрепленного грунта от количества вяжущего для предварительного подбора объема вяжущего (рисунок 10). [14]

а) для минеральных грунтов



где:

1 – торф;

2 – органо-минеральные грунты;

Ц – цемент;

Ц+Ш – цемент и шлак;

Ц+И – цемент и известь;

Ц+Г – цемент и

переувлажненный связный грунт;

Ц+И+Ш – цемент, известь и шлак

б) для органических и органо-минеральных грунтов

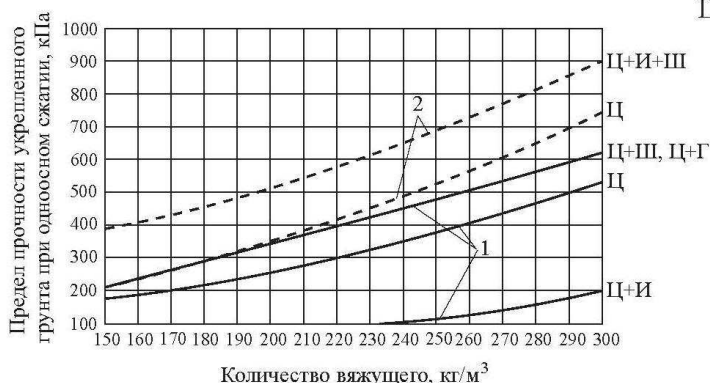


Рисунок 10 – Зависимость предела прочности при одноосном сжатии грунта, укрепленного глубинным смешиванием, от количества грунтов

Как видно по данным графикам, количество добавляемого при смешивании стабилизатора прямо пропорционально влияет на предел прочности укрепленного грунта при одноосном сжатии. При этом можно отметить, что использование в качестве стабилизатора композиции из цемента, извести и шлака является более эффективным, чем применение только цемента.

Основываясь на проведенных ранее исследованиях и составленных графиках, был определен и дополнен перечень рекомендуемых укрепляющих материалов для технологии глубинного смешивания, который представлен в таблице 7.

Таблица 7 – Рекомендуемые стабилизаторы

Слабый грунт	Укрепляющий материал (стабилизатор)		
	Является эффективным материалом	Требует индивидуального исследования и	Не рекомендуется к применению

		обоснования	
Ил, торф	Цемент, гипс, отходы промышленности (шлаки, золы уноса, нефелиновый шлам и т.д.)	Инновационные добавки (табл. 2)	Известь, переувлажненный местный связный грунт, органические (жидкие) добавки
Переувлажненный глинистый грунт	Цемент, гипс, известь, отходы промышленности	Инновационные добавки	Органические добавки, переувлажненный местный связный грунт
Минеральные и органоминеральные (при $I_r = 2-30\%$)	Цемент, гипс, отходы промышленности	Инновационные добавки, органические добавки	Известь, переувлажненный местный связный грунт
Органоминеральные и органические (при $I_r = 2-30\%$)	Переувлажненный местный связный грунт, цемент, органические добавки	Отходы промышленности, инновационные добавки	Известь, гипс

Рекомендации по укрепляющим материалам, приведенным в таблице 7 даны с учетом применения их по отдельности. В случае использования в качестве стабилизатора композитных материалов, необходимо проведение индивидуального исследования.

Несомненно, на данный момент, научная работа над освоением технологии укрепления слабых грунтов основания автомобильных дорог методом глубинного смешивания ведется и по сей день.

Проблема использования современного метода стабилизации в строительстве автомобильных дорог в условиях Сибири связана не с недостатком научных исследований и плохими результатами в данной области, а так скажем, с неготовностью дорожных организаций от давно применяемой и хорошо изученной традиционной технологии.

Решением данной проблемы может послужить точный анализ и обоснованность применяемой технологии стабилизации, выделение преимуществ перед традиционной технологией и доказанный на конкретном примере экономический эффект.

3. Технология производства работ по укреплению слабых грунтов основания автомобильных дорог методом глубинной стабилизации

3.1 Описание технологии стабилизации слабых грунтов

Подготовительные работы выполняются до начала производства работ по возведению земляного полотна и обычно имеют ту же последовательность процессов, что и при методе замены слабых грунтов. К ним относятся восстановление и закрепление трассы дороги, полосы отвода и ее расчистки от леса, пней, кустарников, крупных камней и других предметов, препятствующих выполнению работ; разбивка земляного полотна, срезка и перемещение дернового покрова и растительного грунта с поверхности основания насыпей и с поверхности выемок и резервов; устройство временных дорог в карьеры и для перевозки дорожно-строительных материалов, устройство съездов.

После подготовительных работ производится подбор основных технических параметров технологии глубинного смешивания.

Технологический процесс стабилизации слабых грунтов в целом зависит от применяемого способа укрепления (описаны в главе 1.3 диссертации) и метода смешивания грунтового массива со стабилизатором. Для подбора технологии представим теоретические данные в табличном виде (таблица 8).

Таблица 8 – Подбор технологии стабилизации слабых грунтов

№, п/п	Метод глубинной стабилизации	Метод укрепления (смешивания)	Область применения	Используемые машины и оборудования для смешивания
1	Стабилизация «колоннами»	Заполнение подготовленных колонн стабилизатором (грунтовым композитом)	При стабилизации участка с небольшой протяженностью. Усиление грунта на точечных объектах (ИССО, глубокие болота, торфяные участки). Так же применяется при мощности слабого грунта более 5 м (может быть до 25 метров)	Буровые машины для устройства колонн и свай, оборудование для заполнения стабилизатором
		Вертикальное смешивание грунта		Экскаватор+ специальное оборудование

				(смеситель с вращающейся буровой трубой)
2	Стабилизация «массивом»	Распределение стабилизатора по блокам на поверхности грунта равномерным слоем с последующим смешиванием	Применяется, когда мощность слабого грунта составляет более 0,25м, но не превышает 5м, и слабая толща, может быть укреплена полностью. Данный метод подходит как для сухого, так и влажного смешивания	Экскаватор с роторной фрезой или шнековым смесителем
		Смешивание с подачей вяжущего непосредственно в грунт	То же, но не всегда подходит для сухого смешивания (минеральные материалы). Кроме того, упрощает рабочий процесс при влажном смешивании	То же, но с применением насоса, питателя или компрессора (для подачи стабилизатора под давлением в грунт)
		Разработка слабого грунта и последующее его смешивание со стабилизатором в смесительных установках (Подразумевает укладку на участок готового грунтового композита)	Применяется в случаях невозможности передвижения строительной и дорожной техники по участку ввиду особо неблагоприятных свойств грунта (липкие, разжиженные, болотистые и т.д.)	Экскаватор для разработки грунта, смесительная установка или самоходные смесители, укладчик грунта
		Поверхностное смешивание	Для устройства переходных типов покрытия, для укрепления поверхности слабого грунта на 10-25см	Ресайклеры, дорожная фреза, навесная фреза для дорожных машин
3	Комбинированный метод	Может включать в себя любое сочетание вышеуказанных методов смешивания	Применяется в случаях необходимости использования для укрепления двух методов; При нестабильной мощности залегания слабого грунта	В зависимости от принятых методов смешивания

Выбор метода глубинной стабилизации и технологии с учетом таблицы 8 производится на основании обоснованной целесообразности метода, его экономической эффективности и исходных данных участка внедрения технологии.

После определения стратегии технологического процесса, последующим этапом работ является подготовка строительной площадки. Сюда относят такие работы, как разбивка площади слабого грунта на блоки – при стабилизации «массивом» или разметка свайного поля – в случае стабилизации «колоннами». В некоторых случаях, с учетом низкой прочности слабых грунтов естественного основания, назначают работы по устройству рабочей платформы для расположения техники, машин и оборудования, а также транспортировки стабилизатора. Рабочая платформа создается по способу «от себя» путем укладки полотен геотекстильного материала и отсыпки на него дренирующего грунта. При дальнейших работах, устройство рабочей платформы обычно не требуется, так как движение осуществляется по укрепленному и стабилизированному грунту. [14]

Далее, до начала производства работ по смешиванию, производят транспортировку необходимого количества стабилизатора и материалов для укрепления. Транспортируемый материал в зависимости от своих свойств, складывают и хранят в соответствии с требованиями нормативной документации. Для транспортировки материалов обычно используются автосамосвалы, но в некоторых случаях могут быть использованы автобетоновозы. Выгрузка привезенного материала производится либо непосредственно на место производства работ, либо в бункеры или питатели. [2]

Основным этапом технологии глубинной стабилизации является смешивание слабого грунта со стабилизатором. Состав технологического оборудования и дорожно-строительных машин зависит от выбранного метода смешивания (таблица 8).

Смешивание грунта со стабилизатором по некоторым соображениям может быть произведено вне участка производства работ, в этом случае потребуется разработка слабого грунта и загрузка его в смесительные установки, куда так же дозируют стабилизатор. Положительной стороной такого метода является однородное и тщательное смешивание, а также простота дозирования нужного объема и количества стабилизатора. Но отрицательным является все тот же большой объем земляных работ, что и при традиционном методе замены слабых грунтов, а значит, и низкий экономический эффект. Поэтому чаще всего при стабилизации грунтов прибегают к другим методам.

Перемешивание распределенного на поверхности стабилизатора и с дозированием стабилизатора в грунт имеют похожий технологический процесс. Необходимое количество стабилизатора определяется соответственно принятому размеру блока или колонны. При укреплении в колоннах, за счет создания давления и вращения лопастей (шнеков) смесителя происходит вертикальное его перемещение и подача вяжущего от центра сваи к периферии (рисунок 11). При укреплении в массиве перемешивание грунта с вяжущим производится путем перемещения смесителя сверху вниз и справа налево по челночной схеме по всей площади размеченного блока до полной гомогенизации массы грунта в блоке (рисунок 12).



Рисунок 11 – смешивание при стабилизации колоннами



Рисунок 12 – смешивание при стабилизации массивом

После смешивания поверхность стабилизированного грунта может быть дополнительно покрыта геосинтетическим материалом, или слоем из песчаного или крупнообломочного грунта с высокими прочностными характеристиками. [14]

Последующим этапом работ является разравнивание и планировка укрепленного грунта с помощью самоходных машин – бульдозера, автогрейдера или профилировщика. Планировка проводится для выдержки проектных отметок оси будущей автомобильной дороги, создания поперечных и продольных уклонов.

В завершении работ по стабилизации укрепленный грунт уплотняется с помощью грунтовых, пневмоколесных или гладковальцовых катков до требуемой плотности грунтов. Обычно уплотнение имеет тот же технологический процесс, что и при традиционном методе производства работ. Дорожные катки играют особо важную роль и обеспечивают надежный фундамент для последующих работ по строительству автомобильной дороги.

Длину участка (захватки) укладки укрепленного грунта назначают из расчета, что все технологические операции по приготовлению смеси, ее укладке и уплотнению должны быть закончены в течение двух рабочих смен, при этом разрыв во времени между увлажнением смеси и ее окончательным уплотнением не должен быть более 16 ч. [30]

Уход за свежеложенным слоем основания из укрепленного грунта осуществляют в соответствии с требованиями нормативной и проектной документацией. Если разрыв во времени между устройством дорожного основания и укладкой покрытия составляет не более суток, то уход за свежеложенным слоем укрепленного грунта не осуществляют. Движение построечного транспорта по слою укрепленного грунта разрешается открывать не ранее чем через 5-7 суток после его устройства.

После завершения работ по стабилизации основания земляного полотна необходимо выдержать время на консолидацию и набора несущей способности грунтов. Далее проводят повторные испытания основания после стабилизации и контроль качества выполненных работ.

Контроль качества работ согласно методике, обеспечивается за счет проведение входного контроля, контроля хода проведения работ, технологии и контроля технологических параметров укрепления (количество вяжущего, глубина смешивания и т.д.). [14]

После производства работ проводят обязательный операционный контроль качества укрепленного грунта, в ходе которого определяют плотность, влажность, проводят оценку и сравнение полученного значения предела прочности при сжатии с проектным значением. Так же дополнительно

могут быть проведены испытания на водопроницаемость, водонасыщение, морозостойкость и другие характеристики (указаны в таблице 4) [8]

Качество образцов укрепленного грунта считается обеспеченным, если не более 10 % исследуемых образцов имеют 5%-ное отклонение прочности (в меньшую сторону) от требуемого проектного значения. Отбор проб укрепленного грунта при операционном контроле проводят не реже чем через 200 м в трех точках по поперечнику площадки укрепления - по оси автомобильной дороги и произвольно по левой и правой части от оси, при этом отобранные образцы должны быть взяты с разной глубины слоя. [14]

При положительных результатах исследования, продолжают дальнейшее производство работ по строительству автомобильной дороги, земляного полотна и дорожной одежды.

3.2 Подбор технологического процесса на конкретном примере

Для того, чтобы рассмотреть необходимость внедрения технологии стабилизации и технологический процесс более подробно, в качестве объекта исследования принимаем реальный объект дорожной сети, находящийся в Енисейском районе Красноярского края, а именно участок автомобильной дороги Енисейск – Погадаево – Баженово км 10 – км 12, запланированный КГКУ «КрУДор» в планы работ по ремонту на 2020 г. Данный участок автомобильной дороги является безальтернативным звеном, обеспечивающим транспортную связь населённых пунктов Туруханского и Енисейского районов (рисунок 13).



Рисунок 13 – местоположение рассматриваемого участка

После завершения необходимых проектно-изыскательских работ, а также изучения свойств слабых грунтов на местности, оценивают актуальность применения и проводят изучение и описание объекта внедрения технологии, в целях оптимально-рационального выбора оборудования и техники для производства работ по укреплению слабых грунтов.

Дорожная сеть Енисейского района представлена в виде региональных дорог, где главной транспортной артерией, соединяющей крупные населенные

пункты, является автомобильная дорога Красноярск – Енисейск. Так же сеть представлена автомобильными дорогами Енисейск – Высокогорский, Енисейск – Горская, Енисейск – Пировское, Енисейск – Погадаево – Баженово, Епишино – Североенисейский и т.д. Общая доля протяженности дорог данного района насчитывает более 1700 км.

Для автомобильных дорог Енисейского района характерны повышенные и даже сверхнормативные нагрузки, обусловленные высокой интенсивностью движения грузовых автопоездов и лесовозов, поэтому как итог такого воздействия – деформации основания и дорожной одежды автомобильной дороги. В г. Лесосибирск базируется один из крупнейших в России комплексов переработки древесины, производитель пиломатериалов, древесноволокнистых плит АО «Лесосибирский ЛДК №1» который ежегодно перерабатывает свыше 1 млн кубометров круглого леса, в свою очередь транспортированного по автомобильным дорогам Енисейского района. Общая расчетная лесосека комбината составляет 2,9 млн. м³/год.

Стоит отметить так же и то, что в Енисейском районе существует высокая перспектива развития дорожной сети в связи с большим объемом природных богатств и ресурсов. Примером может служить проект строительства Высокогорского моста, который был включен в проект распоряжения правительства РФ о реализации комплексной инвестиционной программы «Енисейская Сибирь», а также строительство автомобильных дорог в Северо-Енисейском районе. Таким образом, можно с уверенностью сказать, что транспортные нагрузки и воздействие на автомобильные дороги Енисейского района будут продолжаться и вероятнее всего увеличиться.

Енисейский район находится во II дорожно-климатической зоне с резко-континентальным климатом с холодными зимами и непродолжительным летом. Вся территория находится в прохладном и достаточно увлажнённом агроклиматическом районе. Продолжительность холодного периода (при $t < 0^{\circ}\text{C}$) составляет 187 дней, средняя температура воздуха за год $-1,9^{\circ}\text{C}$, среднее

количество осадков за год – 501 мм. Особенностью данного района является и большое количество осадков. [40]

Рассматривая Енисейский район с геологической точки зрения, следует отметить, что здесь широко распространены слабые и переувлажненные глинистые грунты ввиду климатических характеристик района. Здесь так же не исключено и наличие многолетнемерзлых грунтов. Кроме того, распространено так же такое явление, как торфяные болота, которыми покрыто около 12560 км², что составляет практически 12% от всей площади занимаемой территории. [41]

В данном районе не редко возникают деформации земляного полотна, основания, дорожных одежд по причине наличия слабых грунтов. Примеры деформаций автомобильных дорог в Енисейском районе представлены на фото (рисунок 14 – 17).



Рисунок 14 – а/д «Пировское – Комаровка» - Просадка слабого основания с продавливанием грунта от воздействия транспорта



Рисунок 15 – Деформации покрытия автомобильной дороги из-за потери прочности слабого грунта в земляном полотне



Рисунок 16 – а/д «Енисейск – Пировское» - Деформации покрытия автомобильной дороги из-за потери прочности слабого грунта в земляном полотне



Рисунок 17 – Слабые грунты в земляном полотне автомобильной дороги

Можно отметить, что такие деформации в Енисейском районе не случайны и довольно часто проявляются в ходе эксплуатации автомобильных дорог, на которых межремонтный срок еще не пройден. При этом чаще всего возникают деформации по второй группе предельных состояний, когда дорожная одежда приходит в непригодное состояние из-за потери прочности слабого грунтового массива земляного полотна. [5]

Итак, из-за происходящих деформаций в основании и земляном полотне, нарушается нормативное состояние дорожного покрытия, что прямо пропорционально влияет на безопасность дорожного движения, пропускную способность и транспортно-эксплуатационные показатели автомобильной дороги.

Уменьшить воздействие климатических условий и транспортных нагрузок практически невозможно. Поэтому, исключить вышеперечисленные

деформации можно либо путем улучшения характеристик имеющегося слабого грунта, либо путем замены слабого грунтового массива, что обычно является традиционным способом при производстве работ.

Далее, после изучения основных характеристик объекта исследования, составляют методику и проводят лабораторные испытания со слабыми грунтами и выбранными стабилизаторами (описаны во второй главе диссертации). После исследования характеристик, на основе сравнительного анализа выбирают такой стабилизатор, который будет наиболее выгоден с точки зрения транспортировки, производства работ и по качественно ценовым показателям.

Рассмотрим технологию укрепления слабых грунтов основания автомобильной дороги методом глубинной стабилизацией при этом, в качестве стабилизатора принимаем более выгодный с точки зрения экономии нефелиновый шлам (таблица 3). Применение нефелинового шлама для укрепления слабых грунтов показывало отличные результаты.

Пусть, на участке автомобильной дороги Енисейск – Погадаево – Баженово км 10 – км 12 III технической категории необходимо укрепить слой из слабых переувлажненных глинистых грунтов естественного основания на глубину 70 см рабочего слоя протяженностью 100 метров.

В данном случае, используя для подбора технологии таблицу 8 можно сделать вывод, что рациональным будет использование технологии стабилизации грунтов «массивом», т.е. сухого смешивания слабого грунта со стабилизатором, так как слой слабого грунта имеет мощность менее 5 м. [14] При этом оптимальным вариантом (согласно таблице 8) будет распределение стабилизатора на поверхности слабого грунта равномерным слоем и использованием специального оборудования (ротаторной фрезы) для смешивания. Это обосновывается тем, что для равномерного смешивания в связи с небольшой мощностью слабого грунта не потребуется подача вяжущего непосредственно в грунт с помощью компрессора.

Тогда, технологический процесс укрепления слабых грунтов в основании методом глубинной стабилизации в данном случае можно представить из следующих технологических операций [10]:

- 1) Подготовительные работы по закреплению трассы и строительной площадки, вырубка древесно-кустарниковой растительности, корчевка пней в полосе отвода автомобильной дороги;
- 2) Геодезические работы/нивелирование и снятие черных отметок земли (разбивка земляного полотна);
- 3) Снятие почвенно-растительного слоя грунта с помощью бульдозера;
- 4) Разбивка поверхности на участки для стабилизации;
- 5) Транспортировка нефелинового шлама автосамосвалами на место производства работ и выгрузка его непосредственно на поверхность слабого грунта;
- 6) Распределение шлама в 30% соотношении к объему грунта на местности с помощью бульдозера или автогрейдера;
- 7) Смешивание нефелинового шлама со слабым грунтом на необходимую глубину (в данном случае - 70 см) с помощью самоходного экскаватора со шнековым смесителем или фрезой (рисунок 18);
- 8) Планировка перемешанного грунта бульдозером или автогрейдером;
- 9) Уплотнение основания с помощью катков до требуемой плотности грунтов.



Рисунок 18 – Шнековый смеситель экскаватора и фреза роторная [42]

Глубинное смешивание нефелинового шлама со слабым грунтом при мощности слоя 0,7м рационально производить с помощью экскаватора по методу заранее размеченных участков в виде блоков и последовательным перемещением от одного участка к другому. Такой метод носит название «блочная стабилизация». Схема данного метода представлена на рисунке 19.

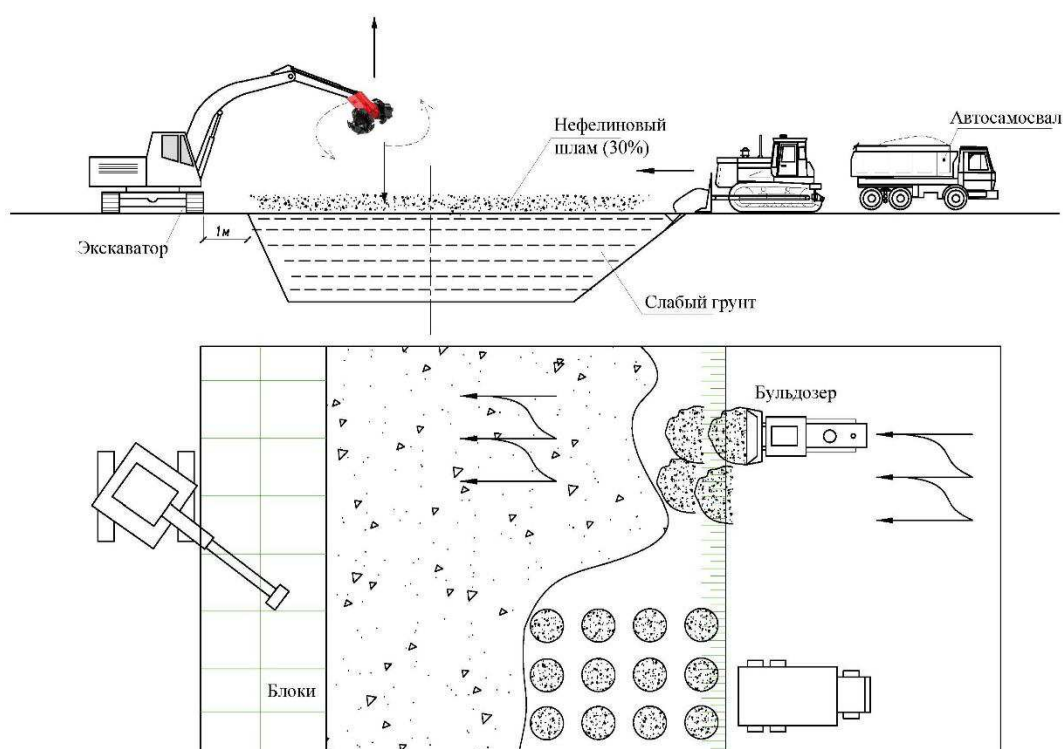


Рисунок 19 – Схема метода блочной стабилизации грунта

Размеры блока в данном случае определяются на основании исходных данных, типа слабого грунта, конкретных условий местности и в зависимости от производительности экскаватора в смену.

Перемешивание грунта со стабилизатором производится путем перемещения роторной фрезы сверху вниз и справа налево по челночной схеме по всей площади размеченного блока до полной гомогенизации массы грунта в блоке. Схема перемешивания может так же корректироваться в зависимости от конкретных условий местности и свойств слабого грунта. [14]

3.3 Сравнительный технологический анализ метода глубинной стабилизации с традиционным методом

Для сравнительного технологического анализа рассмотрим технологические операции традиционного метода (замена слабого грунта).

Состоит из следующих основных дорожных работ:

- 1) Подготовительные работы по закреплению трассы и строительной площадки, вырубка древесно-кустарниковой растительности, корчевка пней в полосе отвода автомобильной дороги;
- 2) Геодезические работы/нивелирование и снятие черных отметок земли (разбивка земляного полотна);
- 3) Снятие почвенно-растительного слоя грунта с помощью бульдозера;
- 4) Разработка слабого грунта экскаватором с последующей погрузкой в автосамосвалы;
- 5) Транспортировка слабого грунта в отвал;
- 6) Транспортировка щебенистого грунта автосамосвалами на место производства работ;
- 7) Отсыпка и распределение щебенистого грунта на местности бульдозером;
- 8) Планировка отсыпанного грунта бульдозером или автогрейдером послойно;
- 9) Уплотнение основания с помощью катков до требуемой плотности грунтов.

Схема технологических операций по разработке слабого грунта и его замены на щебенистый грунт представлена на рисунке 20.

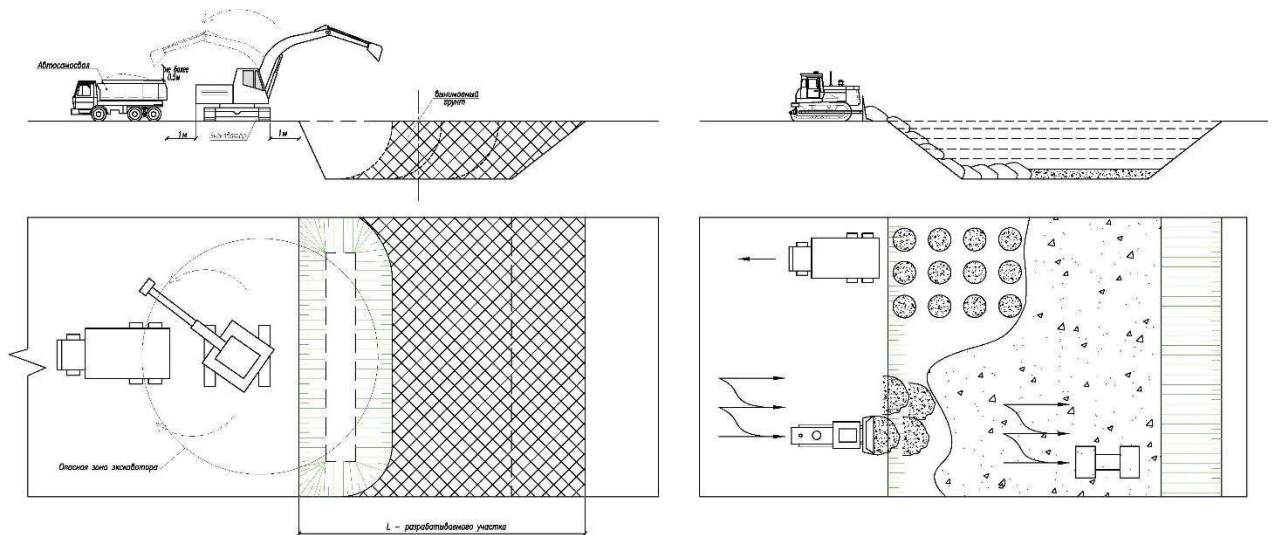


Рисунок 20 – схема традиционного метода замены слабого грунта

При этом, типовой поперечный профиль, устроенного в насыпи земляного полотна автомобильной дороги III категории в соответствии с нормами проектирования может быть представлен в следующем виде (рисунок 21).

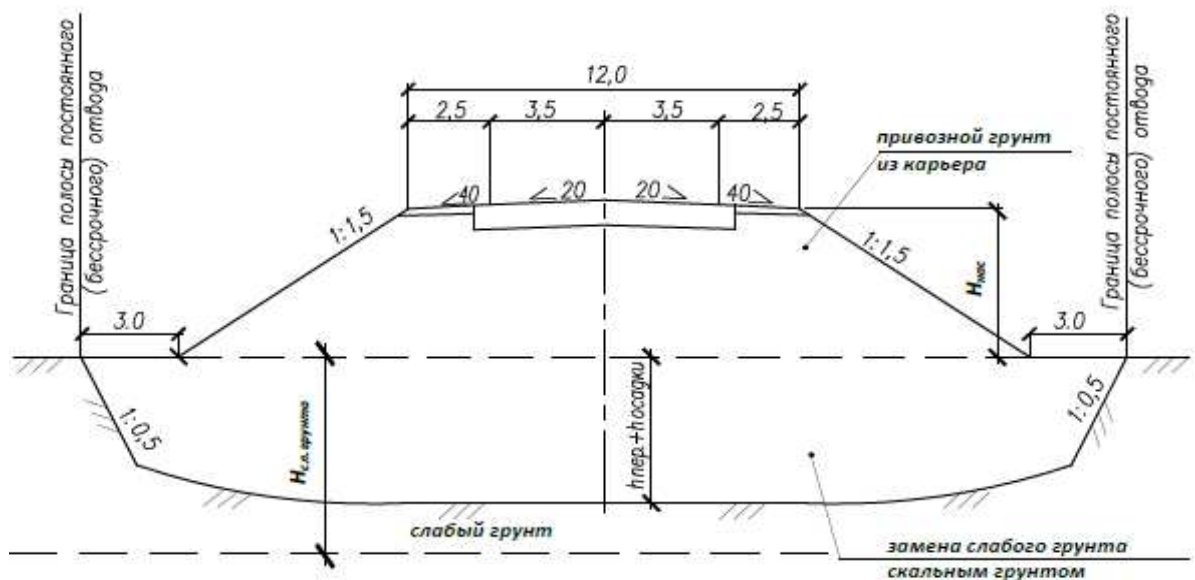


Рисунок 21 – Типовой поперечный профиль автомобильной дороги III категории, устроенной на слабых грунтах с помощью традиционного метода.

Как видно из рисунка 21, для устройства земляного полотна автомобильной дороги потребуется большое количество трудозатрат на земляные работы и транспортировку материалов (к примеру, скальный грунт).

Теперь рассмотрим типовой поперечный профиль устроенного в насыпи земляного полотна автомобильной дороги III категории при использовании метода стабилизации слабых грунтов (рисунок 22).

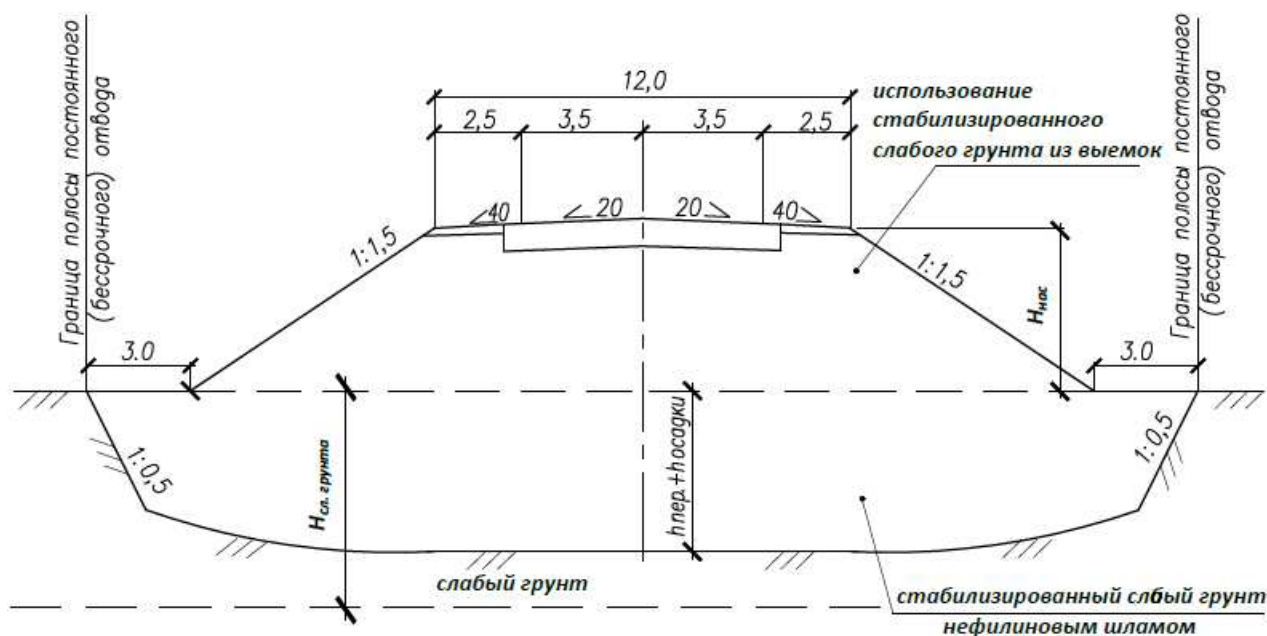


Рисунок 22 – Поперечный профиль автомобильной дороги III категории, устроенной на слабых грунтах с помощью метода стабилизации грунтов.

Как мы видим, в данном случае стабилизация позволяет избежать транспортных расходов материала, за исключением нефелинового шлама. Объем земляных работ в данном случае так же сокращается. При этом объем работ по устройству дорожной одежды, обочин и откосов остается таким же, как и в традиционном методе. Кроме того, появляется возможность использовать стабилизированный местный грунт при строительстве насыпи земляного полотна.

Рассмотрим оба метода и проведем оценку с технологической стороны.

С точки зрения производства работ и технологии, оба метода имеют как свои недостатки, так и преимущества.

Значительно сокращается объем транспортируемого материала. Так, если при традиционном методе необходимо произвести транспортировку выкопанного грунта в отвал, затем обеспечить транспортировку такого же объема грунта для замены, то в методе стабилизации грунта достаточно осуществить только транспортировку стабилизатора для укрепления. В связи с этим потребуется меньшее количество автосамосвалов. Использование транспортировки нефелинового шлама железнодорожным транспортом можно сократить стоимость и трудоемкость доставки материала.

Эффективность метода заключается в последовательном выполнении работ незамедлительно и прямо на местности. В данном случае исключаются временные перерывы на транспортировку грунта, его разгрузку и загрузку.

Для производства работ указанными методами потребуются следующая техника: бульдозер, экскаватор, каток и автосамосвалы. Основной машиной для производства работ является экскаватор. В первом случае для выполнения работ достаточно ковша, во втором случае необходимо наличие специализированного шнекового смесителя (роторной фрезы), что является недостатком данного метода в связи с расходами на закупку и установку оборудования. Кроме того, при большой мощности слабого грунта требуется дополнительное оборудование для подачи стабилизатора непосредственно в грунт. В качестве этого может быть использован компрессор с гибким трубопроводом, по которому под давлением осуществляется подача стабилизатора непосредственно в грунт.

Применение шнекового смесителя или роторной фрезы для стабилизации ограничено физико-механическими свойствами грунта. Например, в случаях наличия вечномерзлого грунта, суглинков тяжелых, каменных пород возможно снижение производительности и даже повреждение технологического оборудования. В переувлажненных грунтах и торфах возможно повышение расхода стабилизатора, что определяется индивидуально с помощью проведения лабораторных испытаний.

Еще одним важным показателем является продолжительность производства работ. Для полной замены грунта, транспортировки и послойного его уплотнения потребуется достаточно много времени и большой объем работ, но данные работы возможно завершить за один строительный сезон. В случаях глубинной стабилизации, в зависимости от свойств грунта, может потребоваться время для консолидации и набора необходимой прочности, которое по информации разных источников может составить от 7 до 90 суток, в отдельных случаях даже более. [31]

Оценку двух методов представим в таблице 9. Для сравнения двух методов примем следующие исходные данные:

- место проведения работ – автомобильная дорога Енисейск – Погадаево – Баженово км 10 – км 12;
- техническая категория – III;
- мощность укрепляемого (заменяемого) слоя слабого грунта – 0,7 м;
- слабый грунт – глинистый переувлажненный, плотностью 1600 кг/м³;
- щебень для замены слабого грунта средней плотностью 1400 кг/м³;
- расход шлама – 30% по массе слабого грунта;
- ширина участка производства работ – 30 м;
- длина укрепляемого участка – 100 м (площадь - 3000 м²).

Таблица 9 – Основные параметры для оценки методов.

№	Параметры оценки	Метод замены слабых грунтов	Метод стабилизации слабых грунтов
1	Объем транспортировки материалов на 1м ² : - слабый грунт - грунт для замены/шлам	1120 кг 980 кг	- 336 кг
2	Объем транспортировки материалов на 3000 м ² : - слабый грунт - скальный грунт/шлам	3360 т. 2940 т.	- 1008 т.

3	Количество рейсов автосамосвала (КамАЗ 6522) грузоподъемностью 14т. для транспортировки инертных материалов	450	72
4	Дальность транспортировки: - ж/д транспорт - автосамосвалы - в отвал	- 30 км 10 км	274 км 50 км -
5	Суммарный потребный пробег автосамосвалов (в одном направлении)	8700 км	3600 км
6	Потребность в дорожных машинах	Бульдозер Экскаватор Автосамосвалы Каток	Бульдозер Экскаватор Автосамосвалы Каток
7	Потребность в специализированном оборудовании	нет	Шнековый смеситель или фреза роторная для экскаватора
8	Объем разработки грунта экскаватором: - на 1м ² - на 3000 м ²	1,12 т. 3360 т.	- -

Анализируя таблицу 9, можно сказать, что при заданных характеристиках стабилизация слабых грунтов уменьшает количество транспортировки инертных материалов и потребность рейсов автосамосвалов в 6,25 раз. При этом, суммарный пробег автосамосвалов для транспортировки материалов уменьшается 2,4 раза. Это достигается за счет отсутствия потребности в разработке грунта землеройно-транспортными машинами (экскаватора) при методе стабилизации слабых грунтов.

Рассмотрев технологические процессы каждого из двух методов и проанализировав их основные параметры, для дальнейшей оценки, составим примерные технологические схемы, используемые при производстве дорожных работ (Приложение №1 к данной работе).

Как видно из сравнения данных схем, оба метода имеют пять основных

этапов производства работ, из которых первый и последние два этапа являются практически идентичными (подготовительные работы, снятие ПРС, планировка и уплотнение основания).

Основные различия можно наблюдать при втором и третьем этапе производства работ. При традиционном методе замены слабых грунтов производство работ организовано последовательным методом, т.е. каждый новый этап строительства основания начинается после того, как закончен предыдущий. Например, транспортировка, отсыпка и разравнивание щебенистого грунта не может быть осуществлена, пока не закончены работы по разработке и удалению слабого грунта. При этом методе совмещенность работ равна нулю, причем как однотипных, так и разнотипных. Достоинствами метода является то, что, во-первых, требуется меньше исполнителей в единицу времени, и, во-вторых, легко меняется структура организации работ при сбое какого-либо вида работ. К недостаткам метода следует отнести наибольшую продолжительность работ по сооружению объекта.

При технологии стабилизации слабого грунта появляется возможность использования поточного и параллельного метода организации производства работ, при котором разнотипные работы могут совмещаться во времени и в пространстве. Так, транспортировка стабилизатора, распределение его на местности и смешивание может проводится одновременно в один этап, не дожидаясь окончания работ предыдущего этапа. При поточном и параллельном методе продолжительность строительства будет меньше, чем при последовательном методе. Данные методы организации строительства предполагают обязательное наличие специализированных бригад, что в свою очередь позволяет максимально механизировать труд, улучшить организацию строительства, производить работы непрерывно и повысить производительность труда.

Благодаря использованию поточного метода, снижению объемов транспортировки и земляных работ, как видно из рассматриваемых технологических схем (приложение 1), можно отметить сокращение графика

работы при методе стабилизации слабых грунтов. Согласно графику, сроки производства работ сократились на 6 условных единиц времени, что составляет 12%. На основании этого, можно сделать вывод о возможном сокращении сроков строительства основания на слабых грунтах при использовании метода глубинной стабилизации.

Еще одним значительным преимуществом метода стабилизации слабых грунтов является возможность использования укрепленного нефелиновым шламом грунта в качестве нижнего слоя основания дорожной одежды, как это показано на рисунке 23.

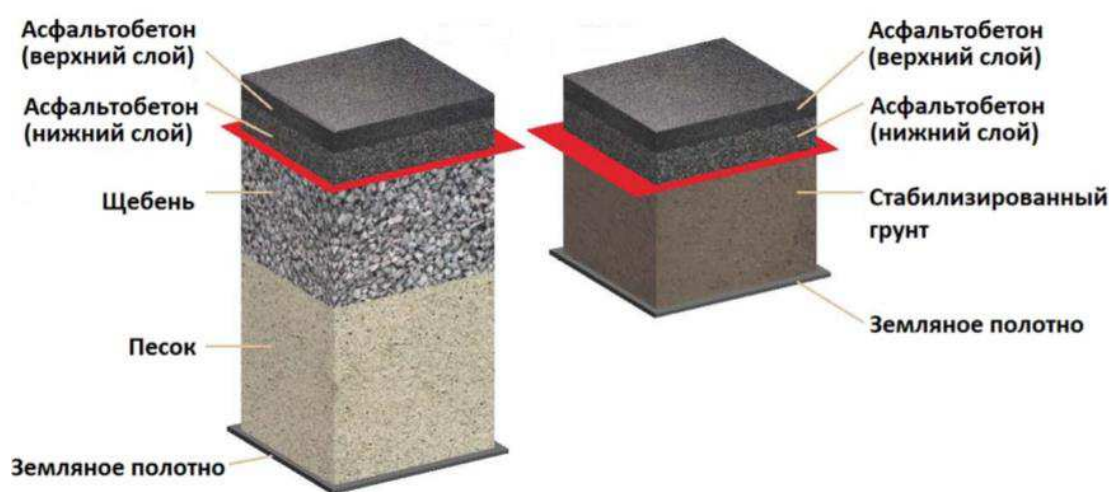


Рисунок 23 – вариант использования стабилизированного грунта в качестве основания дорожной одежды

Научные и экспериментальные исследования в данном направлении так же показали хорошие результаты (описаны во II главе диссертации) и способность стабилизированных грунтов в полной мере заменять основания из традиционно-используемых материалов (песок, щебень, и т.д.). Это так же может быть подтверждено расчетом нежестких дорожных одежд на несущую способность.

По своей технологии, применение стабилизированного грунта в основании дорожных одежд имеет много общего с традиционной технологией и предполагает тот же набор процессов. Основания дорожных одежд из стабилизированных грунтов так же могут устраиваться с применением инновационных добавок (таблица 2) в качестве стабилизатора и

использованием метода холодного ресайклинга.

Важным составляющим является и то, что метод стабилизации грунта в массиве является экологически чистым, так как исключает утилизацию непригодного для строительства грунта, при этом нефелиновый шлам имеет пятый класс опасности, что означает практически неопасный.

Применение отходов промышленности в виде шламов позволяет:

- использовать слабые, ранее не пригодные для строительства грунты в качестве дорожно-строительного материала в сочетании с нефелиновым шламом, что существенно удешевляет дорожное строительство и уменьшает объем работ с технологической точки зрения;

- использовать нефелиновые шламы в качестве стабилизатора, что позволит уменьшить объем отходов, которые занимают большие площади в Ачинском районе и складировются в отвалах;

- избежать затраты качественных дорогостоящих материалов (скала, щебень, и др.).

3.4 Сравнительный технико-экономический анализ методов

Для технико-экономического анализа используя составленные технологические схемы (Приложение 1), проведены локальные сметные расчеты для разных видов работ при устройстве земляного полотна традиционным методом с заменой слабого грунта и методом укрепления слабого грунта глубинной стабилизации массивом.

Полные локальные сметные расчеты в текущих ценах (по состоянию на 3 квартал 2019 года) представлены в Приложении 2 – 3 к данной диссертации.

По локальным расчетам можно заметить, что в первом случае основную статью затрат составляет приобретение щебня для строительных работ и его транспортировка на расстояние 30 км до места производства работ (база природного щебня находится в д. Южаково, Енисейский район). Во втором случае основные затраты приходятся на фрезерование грунта экскаватором с роторной фрезой на глубину 0,7 м с последующим смешиванием. При этом использование нефелинового шлама составляет малую часть затрат.

Сравнивая полученные локальные расчеты можно сделать вывод, что Земляное полотно, устроенное с укреплением слабых грунтов методом глубинной стабилизации по сравнению с традиционным методом, приводит к уменьшению сметной стоимости строительных работ в 2,23 раза (3016,75 тыс. руб. по сравнению с 1348,326 тыс. руб.) при принятых исходных данных. При этом оплата труда рабочих увеличилась в 1,8 раза (с 1,875 тыс. руб. до 3,364 тыс. руб.). Основные технико-экономические показатели представлены в таблице 10.

Таблица 10 - Основные технико-экономические показатели

№	Параметры оценки методов (при мощности слоя – 0,7м)	Метод замены слабых грунтов (ЛСР №1)	Метод стабилизации слабых грунтов (ЛСР №2)
1	Стоимость на материалы, тыс.руб. (без НДС)	1 188,784 (Щебень из природного камня)	42,024 (Шлам АГК)

2	Стоимость транспортировки материалов, тыс.руб. (без НДС)	1 192,353	243,828
3	Фонд оплаты труда, тыс. руб. (с НДС)	1,857	3,364
4	Общая стоимость строительных работ, тыс. руб. (с НДС)	3 016,750	1 348,326
5	Стоимость дополнительного оборудования, необходимого для проведения работ	-	Варьируется в зависимости от мощности фрезы $\approx 1 - 1,5$ млн. руб.

Однако в сметном расчете не было учтено технологическое оборудование для метода глубинной стабилизации грунтов, а именно стоимость роторной фрезы для экскаватора, так как оценивать сметный расчет с учетом ее стоимости в устройстве земляного полотна на принятую расчетную длину 100 метров неправильно. Проведя поисковой анализ, выяснено, что данное оборудование возможно приобрести в таких организациях г. Красноярска, как ООО "Енисей-М" [43], ООО "Предприятие "Стройкомплект" и др. Ориентировочная стоимость навесного оборудования в виде фрезы роторного типа варьируются от 1 млн. руб. до 3-5 млн. руб. в зависимости от мощности и характеристик фрезы. При больших объемах работ, как видно по локальным сметным расчетам, применение такого оборудования окажется эффективным и способно полностью оправдать затраченные средства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной научной работе в качестве теоретической базы были рассмотрены классификация и характеристики различных типов слабых грунтов, изучены основы проектирования оснований автомобильных дорог на слабых грунтах, а также понятие технологии глубинной стабилизации.

На основании сравнительного анализа с другими методами укрепления грунтов, выделены преимущества технологии глубинной стабилизации, а именно: гибкость применения метода, экономия материалов, экологичность, возможность использования отходов промышленности и другие. [2]

Проведя оценку строительных материалов, отходов промышленности и инновационных добавок в качестве стабилизаторов, было доказано, что применение отходов промышленности (шлаков, зол и шламов) с учетом большего потребного расхода материалов для стабилизации, оказывается экономически выгоднее других. Но использование тех или иных стабилизаторов необходимо проектировать индивидуально для конкретного объекта и природно-климатических условий местности, разновидности слабого грунта и его физико-механических свойств, а также доступности сырьевых баз.

Анализируя ранее проведенные научные исследования, можно сделать вывод, что методом глубинной стабилизации является высокоэффективным с точки зрения улучшения свойств и характеристик исходных материалов. Внесение стабилизаторов в слабый грунт снижает влажность и повышает плотность основания, позволяет увеличить прочность и модуль упругости, а также благоприятно влияет на теплопроводность и водонасыщение. Это подтверждено так же и опытно-экспериментальным путем, где практически во всех случаях был отмечен положительный эффект использования данной технологии.

С целью проверки рациональности и эффективности применения технологии глубинной стабилизации в реальных условиях, данный метод был рассмотрен на конкретном объекте исследования. В качестве объекта

исследования был принят реальный объект дорожной сети, находящийся в Енисейском районе Красноярского края, а именно участок автомобильной дороги Енисейск – Погадаево – Баженово км 10 – км 12. В сравнительном технологическом и экономическом анализе были рассмотрены два варианта строительства автомобильной дороги с наличием слабых грунтов в основании – с применением метода замены слабых грунтов (традиционный метод) и метода глубинной стабилизации.

Благодаря выполненной технологической оценке, было доказано, что с технологической точки зрения глубинная стабилизация позволяет значительно уменьшить объем транспортировки материалов и объем работ землеройно-транспортных машин, а также сократить сроки строительства. С экономической точки зрения по локально-сметным расчетам метод глубинной стабилизации оказался значительно выгоднее традиционного. Но при этом, возникает потребность в дополнительном навесном оборудовании (фреза роторная) для экскаватора.

Добиться повышения положительного экономического и технологического эффекта глубинной стабилизации позволяет так же возможность использования стабилизированного местного грунта при строительстве насыпи земляного полотна и в качестве нижнего слоя основания дорожной одежды.

При рассмотрении использования метода стабилизации слабых грунтов, рекомендуется в каждом отдельно взятом случае в зависимости от климатических и грунтовых условий местности, возможности доставки и стоимости стабилизатора проводить индивидуальный анализ исходных данных, технико-экономическое сравнение и технологическую оценку методов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах, Москва, 2004г;
2. ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА СЛАБЫХ ГРУНТАХ, АРТЕМЬЕВА Н.А., ПОТЫЛИЦИН Ф.С., Сибирский федеральный университет, <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38216661>;
3. Проектирование и возведение фундаментов вблизи существующих сооружений: (Опыт строительства в условиях Северо-Запада СССР) / С.Н. Сотников, В.Г. Симагин, В.П. Вершинин; Под ред. С.Н. Сотникова. — М.: Стройиздат, 1985. — 480 с.;
4. Методические указания по проектированию земляного полотна на слабых грунтах, ОРГТРАНССТРОЙ, Москва, 1968г.;
5. ОДМ 218.2.068-2016 Рекомендации по учету динамического воздействия от современных транспортных средств при расчетах прочности, устойчивости и деформативности земляного полотна;
6. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85*.;
7. ОДН 218.046-01 Проектирование дорожных одежд нежесткого типа;
8. СТО СРО 083-029EN-2011 «Разработка и реализация методов стабилизации слабых грунтов органического происхождения»;
9. Mass stabilization manual, Juha Forsman, Harri Jyrävä, Pentti Lahtinen;
10. Пособие по возведению земляного полотна автомобильных дорог, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, М. Н. Першин, Г. И. Артюхина, 2007 г.;
11. Патент от 30.07.2018г. №RU2662737 (Недзвецкий Д.Н.);
12. Патент №RU2467125 от 20.11.2012г. ООО "НПП "Геотек" (г. Пенза);
13. ОДМ 218.1.004-2011 Классификация стабилизаторов грунтов в дорожном строительстве;

- 14.ОДМ 218.2.063-2015 «Рекомендации по применению технологии глубинного смешивания для укрепления слабых грунтов оснований земляного полотна»;
- 15.Клековкина М. П., Филиппова К. В. Инновационные материалы — добавки и стабилизаторы для укрепления грунтов // Техника. Технологии. Инженерия. — 2017. — №3. — С. 31-34. — URL <https://moluch.ru/th/8/archive/62/2486;>
- 16.Интернет журнал «Автомобильные дороги» № 9 (982) Сентябрь, 2013. <http://www.avtodorogi-magazine.ru;>
- 17.Патент от 23.10.2018г. №RU2670468С2;
- 18.Распоряжение правительства Российской Федерации от 29 марта 2019 г. № 571-р, г. Москва;
- 19.[http://polyroad.ru/lbs-i-m-10-50/lbs/tseny/;](http://polyroad.ru/lbs-i-m-10-50/lbs/tseny/)
- 20.Журнал «ДОРОГИ. Инновации в строительстве, вып. №53», май, 2016г.;
- 21.Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 5, No. 3, 2011. International Case Studies of Peat Stabilization by Deep Mixing Method. Mena I. Souliman and Claudia Zapata;
- 22.СП 131.13330.2012 «Строительная климатология»;
- 23.[http://gornovosti.ru/news/aktualno/item/zola-ne-othody-syryo/;](http://gornovosti.ru/news/aktualno/item/zola-ne-othody-syryo/)
- 24.Крафт, С.Л. Формирование радиационных показателей в процессе гидрозолоудаления и хранения золошлаковых отходов Буроугольных ТЭС (на примере Березовкой ГРЭС-1): автореферат на соис. уч. степени к.г.н. / С.Л. Крафт. - Томск, 2010. - 23 с.;
- 25.СТО 91478173-001-2012ООО «НордСтэбРаша» Укрепление слабых грунтов оснований земляного полотна глубинным смешиванием. Общие технические условия, <http://medznate.ru/docs/index-23466.html>;
- 26.ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик»;
- 27.ГОСТ 30416-2012 «Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения»;

- 28.ГОСТ 12248-2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости»;
- 29.Обзорная информация по строительству конструктивных слоев дорожных одежд из грунтов, укрепленных вяжущими материалами, выпуск 3. К.т.н. С.Г. Фурсов, ОАО «Союздорнии», 2007 г.;
- 30.Методические рекомендации по применению нефелинового шлама Ачинского Глиноземного Комбината при устройстве оснований автомобильных дорог в районах Западной и Восточной Сибири. СОЮЗДОРНИИ, Москва, 1981;
- 31.СТО НОСТРОЙ 2.5.135-2013 «Укрепление слабых грунтов методом глубинного смешивания»;
- 32.Научная статья УДК 625.7/.8:624.131.1«Применение технологии глубинного смешивания в массиве для укрепления слабых грунтов оснований насыпей автомобильных дорог», Канд. техн. наук А.П. Фомин, канд. техн. наук С.Н. Шукин, 24.02.2014 г.;
- 33.К.Ю. Ахметова, Л.В. Сиряченко, Н.В. Меньшикова, Е.С. Краснов. Пермский национальный исследовательский политехнический университет. «Опыт проектирования и строительства земляного полотна на слабых грунтах в Пермском крае»;
- 34.Научная статья УДК 625.731-03 Романенко И.И., Романенко М.И., Петровнина И.Н., Пинт Э.М., Еличев К.А. Стабилизация грунта неорганическими вяжущими// Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» 2014. № 6 <http://naukovedenie.ru/PDF/44TVN614.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.;
- 35.УДК 624.138.232.1 «Усиление глинистых грунтов шлаковым вяжущим» Идрисов И.Х. (Пензенский государственный университет архитектуры и строительства);
- 36.Диссертация на тему: «Применение нефелинового шлама для строительства оснований автомобильных дорог в условиях Сибири», к.т.н. Бескровный В.М., 1983г.;

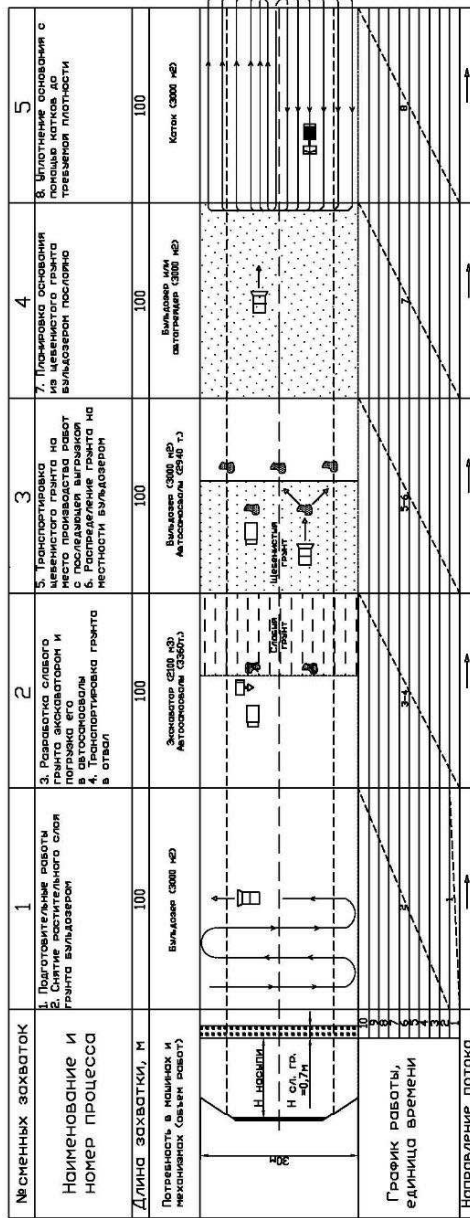
37. ВКР на тему: «Применение нефелинового шлама в строительстве автомобильных дорог и перспективы использования», Еремеев Я.В., Артемьева Н.А., ИСИ СФУ, 2018г.;
38. СН 25-74 Инструкция по применению грунтов, укрепленных вяжущими материалами, для устройства оснований и покрытий автомобильных дорог и аэродромов, 1975 г.;
39. Безрук В.М. Укрепление грунтов в дорожном и аэродромном строительстве. - М.: Транспорт, 1971.;
40. СНИП 23-01-99 – Строительная климатология;
41. Официальный сайт Енисейского района - www.enadm.ru.;
42. <https://www.tradicia-k.ru/catalog/frezy-rotornye>;
43. <https://enisey-m.ru/navesnoe-oborudovanie/stroitelnoe-oborudovanie/frezy-rotornie/>;
44. Руководство по проектно-конструкторским работам: Стабилизация слабых грунтов, СТ97-0351, <https://mognovse.ru/dpm-rukovodstvo-po-proektno-konstruktorskim-rabotam-stabilizac.html>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

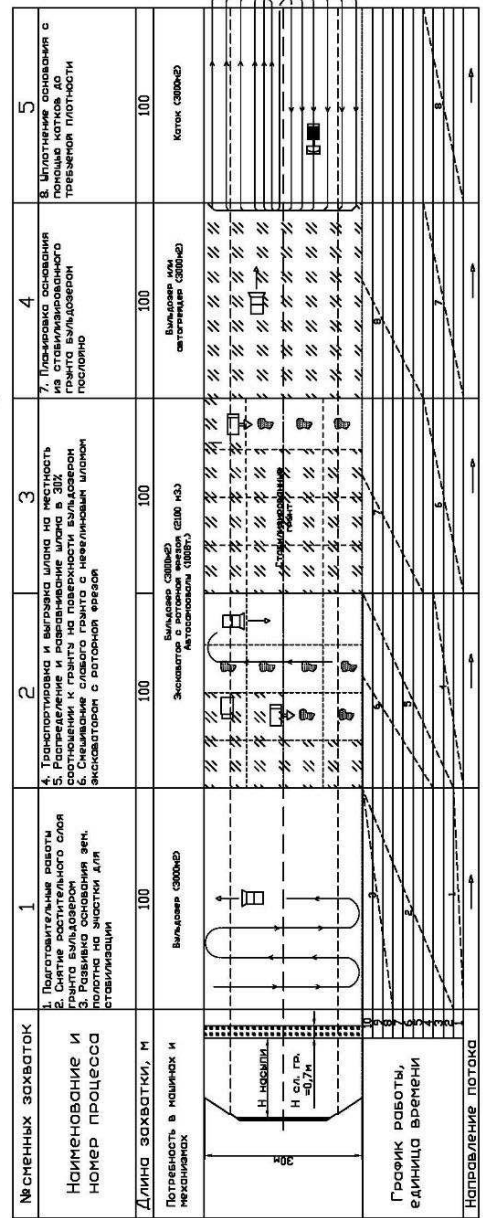
Сравнение технологических схем

Приложение 1. Сравнение технологических схем

1. Технологическая схема традиционного метода



2. Технологическая схема стабилизации слабого грунта



ЛОКАЛЬНЫЙ СМЕТНЫЙ РАСЧЕТ № 1
(локальная смета)

на 2019_Земляное полотно устроенное традиционным методом с заменой слабого грунта
(наименование работ и затрат, наименование объекта)

Основание:

Сметная стоимость строительных работ _____ 3016,750 тыс. руб.

Средства на оплату труда _____ 1,857 тыс. руб.

Составлен(а) в текущих (прогнозных) ценах по состоянию на 2019

№ пп	Обоснование	Наименование	Ед. изм.	Кол.	Стоимость единицы, руб.			Общая стоимость, руб.				
					Всего	В том числе		Всего	В том числе			
						Осн.З/п	Эк.Маш		З/пМех	Осн.З/п	Эк.Маш	З/пМех
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Раздел 1. Земляное полотно												
1	ФЕР01-01-021-01 <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Разработка грунта в котлованах объемом от 3000 до 7000 м3 с погрузкой на автомобиль-самосвалы экскаватором с ковшом вместимостью 1,0 м3, группа грунтов 1	1000 м3	2,1 <i>2100 / 1000</i>	2755,42		2755,42	302,67	5786		5786	636
2	ФССЦпг-03-21-01-010 <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Перевозка грузов автомобилями-самосвалами грузоподъемностью 10 т работающих вне карьера на расстояние: I класс груза до 10 км	1 т груза	3360	11,42		11,42		38371		38371	
Устройство рабочего слоя земляного полотна из скального грунта												
3	ФССЦ-02.2.05.04-0098 <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Щебень из природного камня для строительных работ марка: 1000, фракции 120-150 мм	м3	2100	68,7				144270			
4	ФССЦпг-03-21-01-030 <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Перевозка грузов автомобилями-самосвалами грузоподъемностью 10 т работающих вне карьера на расстояние: I класс груза до 30 км	1 т груза	2940	19,29		19,29		56713		56713	

Разравнивание куч												
5	ФЕР01-01-031-03 <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Разработка грунта с перемещением до 10 м бульдозерами мощностью: 96 кВт (130 л.с.), группа грунтов 3	1000 м3	2,1 <i>2100/1000</i>	1138,01		1138,01	163,35	2390		2390	343
Уплотнение грунта												
6	ФЕР01-02-002-03 <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Уплотнение грунта прицепными кулачковыми катками 8 т на первый проход по одному следу при толщине слоя: 70 см	1000 м3	2,1 <i>2100/1000</i>	1837,35		1837,35	310,3	3858		3858	652
7	ФЕР01-02-001-05 <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Уплотнение грунта прицепными катками на пневмоколесном ходу 25 т на первый проход по одному следу при толщине слоя: 70 см	1000 м3	2,1 <i>2100/1000</i>	662,7		662,7	107,55	1392		1392	226
Итого прямые затраты по смете в базисных ценах									252780		108510	1857
Накладные расходы									1764			
В том числе, справочно:												
95% ФОТ (от 1857) (Поз. 1, 5-7)									1764			
Сметная прибыль									929			
В том числе, справочно:												
50% ФОТ (от 1857) (Поз. 1, 5-7)									929			
Итого по смете:												
Итого Поз. 1, 3, 5-7 "Индекс изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ на 3 квартал 2019г. Красноярский край СМР=8,24"									1321605			
Итого Поз. 2, 4 "Индекс изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ на 3 квартал 2019г. Красноярский край СМР=12,54"									1192353			
Итого									2513958			
Справочно, в базисных ценах:												
Материалы									144270			
Машины и механизмы									108510			
ФОТ									1857			
Накладные расходы									1764			
Сметная прибыль									929			
НДС 20%									502792			
ВСЕГО по смете									3016750			

ЛОКАЛЬНЫЙ СМЕТНЫЙ РАСЧЕТ № 2
(локальная смета)

на 2019_Земляное полотно устроенное с укреплением слабых грунтов методом глубинной стабилизации
(наименование работ и затрат, наименование объекта)

Основание:

Сметная стоимость строительных работ _____ 1348,326 тыс. руб.

Средства на оплату труда _____ 3,364 тыс. руб.

Составлен(а) в текущих (прогнозных) ценах по состоянию на 2019

№ пп	Обоснование	Наименование	Ед. изм.	Кол.	Стоимость единицы, руб.			Общая стоимость, руб.				
					Всего	В том числе		Всего	В том числе			
						Осн.З/п	Эк.Маш		З/пМех	Осн.З/п	Эк.Маш	З/пМех
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Раздел 1. Земляное полотно												
Устройство рабочего слоя земляного полотна с укреплением слабых грунтов												
1	Прайс лист Ачинский глиноземный комбинат	Нефелиновый шлам	т	1008	5,06				5100			
2	ФССЦпг-03-21-01-030 Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пг	Перевозка грузов автомобилями-самосвалами грузоподъемностью 10 т работающих вне карьера на расстояние: I класс груза до 30 км	1 т груза	1008	19,29		19,29		19444		19444	
Разравнивание куч												
3	ФЕР01-01-031-03 Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пг	Разработка грунта с перемещением до 10 м бульдозерами мощностью: 96 кВт (130 л.с.), группа грунтов 3	1000 м3	0,63 630 / 1000	967,31		967,31	138,85	609		609	87
Смешивание грунта												
4	ФЕР01-01-160-02 Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пг	Фрезерование грунта экскаватором с роторной фрезой на глубину 0,7 м	1000 м3	2,1 2100 / 1000	40988,82		40988,8	797,31	86077		86077	1674

5	ФЕР01-01-109-01 <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Смешивание грунта с нефелиновым шламом на месте производства работ	1000 м2	3 <i>3000 / 1000</i>	1585,61	49,06	1536,55	179,96	4757	147	4610	540
6	ФЕР01-02-027-01 <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Планировка площадей: механизированным способом, группа грунтов 1	1000 м2	3 <i>3000 / 1000</i>	91,46		91,46	12,7	274		274	38
Уплотнение грунта												
7	ФЕР01-02-002-03 <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Уплотнение грунта прицепными кулачковыми катками 8 т на первый проход по одному следу при толщине слоя: 70 см	1000 м3	2,1 <i>2100 / 1000</i>	1837,35		1837,35	310,3	3858		3858	652
8	ФЕР01-02-001-05 <i>Приказ Минстроя России от 30.12.2016 №1039/пр</i>	Уплотнение грунта прицепными катками на пневмоколесном ходу 25 т на первый проход по одному следу при толщине слоя: 70 см	1000 м3	2,1 <i>2100 / 1000</i>	662,7		662,7	107,55	1392		1392	226
Итого прямые затраты по смете в базисных ценах									121511	147	116264	3217
Накладные расходы									3022			
Сметная прибыль									1680			
Итого по смете:												
Итого Поз. 1, 3-8 "Индекс изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ на 3 квартал 2019г. Красноярский край СМР=8,24"									879777			
Итого Поз. 2 "Индекс изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ на 3 квартал 2019г. Красноярский край СМР=12,54"									243828			
Итого									1123605			
Справочно, в базисных ценах:												
Материалы									5100			
Машины и механизмы									116264			
ФОТ									3364			
Накладные расходы									3022			
Сметная прибыль									1680			
НДС 20%									224721			
ВСЕГО по смете									1348326			

ПРИЛОЖЕНИЕ Г.

Статьи и публикации

625.711.1

ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА СЛАБЫХ ГРУНТАХ

PROBLEMS OF STRICTING AUTOMOBILE ROADS ON WEAK SOILS

Артемьева Н.А., Потылицин Ф.С.

(Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, РФ)

Artemyeva N.A., Potylitsin F.S.

(Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia)

В данной статье рассмотрены проблемы строительства автомобильных дорог на слабых грунтах, а так же материалы и способы, применяемые для решения данной проблемы.

This article discusses the problem of building roads on weak soils, as well as the materials and methods used to solve this problem.

Ключевые слова: слабые грунты, основание, материалы, стабилизация.

Key words: weak soils, foundation, materials, stabilization.

Строительство автомобильных дорог относится к сложным технологическим процессам, на качество которых оказывает влияние множество факторов. Основными из них являются природно-климатические и грунтово-геологические условия. Большая часть Российской Федерации расположена в зоне с холодным и очень холодными климатическими условиями. Для таких зон характерны грунтовые основания отличающиеся болотными, заторфованными, переувлажненными грунтами, а также насыщенными глинами и суглинками с ледянистыми включениями.

Грунтовые слои различного состава и генезиса, которые в естественных условиях не получили достаточного уплотнения принято называть слабыми. К ним относятся водонасыщенные и сильносжимаемые грунты, которые при приложении нагрузок на основание теряют свои прочностные свойства, следовательно, уменьшается их сопротивление сдвигу, сцепление, возрастает сжимаемость. Но в условиях естественного залегания способны воспринимать медленно возрастающие нагрузки. Непосредственно на них возводить искусственные сооружения и автомобильные дороги нельзя [1].

Слабые грунты, независимо от разновидности, значительно влияют на надежность дорожных конструкций в целом. Влияние таких свойств слабых грунтов, как водонасыщенность, высокая влажность, большая пористость и сжимаемость приводит к деформациям земляного полотна и основания.

В условиях постоянного и переменного воздействия нагрузок от движения транспорта при наличии слабых грунтов земляное полотно подвергается таким деформациям как: оползание откосов насыпи - происходит из-за разной влажности грунтов, которые имеют более низкие прочностные характеристики; сползание насыпи по косогору при наличии наклонно расположенных и переувлажненных верхних слоев слабого грунта в основании; осадка слабого основания и выдавливание слабого грунта из-под подошвы насыпи; осадка с выпором слабого грунта из-за недолговечности конструкций, возведенных на слабых грунтах; проявление деформаций.

Спрогнозировать точную работу конструкции земляного полотна со слабыми грунтами в процессе эксплуатации очень сложно, потому что она будет зависеть от постоянно меняющихся факторов, таких как осевые нагрузки, интенсивность движения, климатические характеристики, режим увлажнения, физико-механических свойств грунта.

Для обеспечения долговечности земляное полотно на участках со слабыми грунтами проектируют в виде насыпей. Требования к грунтам верхней части насыпи (рабочего слоя), и необходимое минимальное возвышение низа дорожной одежды над расчетным уровнем поверхностных и грунтовых вод определены действующим нормативными документами [2].

Капитальные покрытия на насыпях, в основании которых оставлены слабые грунты, устраивают только после завершения не менее 90% расчетной осадки или при условии, что средняя интенсивность осадки за месяц, предшествующий устройству покрытия, не превышает 2 см/год. В некоторых регионах России, особенно в Сибири, характерны короткие периоды производства строительно-монтажных работ ввиду своих природно-климатических условий, большого обилия осадков и перепада температур. Все это значительно влияет на водно-тепловой режим в весенне-осенний период года и выдерживание расчетной осадки в таких условиях становится очень сложной задачей.

Для решения данной проблемы существует множество инженерно-технических методов укрепления оснований автомобильных дорог.

Одной из важнейших задач технологии стабилизации и укрепления грунтов методом глубинного смешивания является получение стабильных физико-механических показателей слабых грунтов в основаниях, а также повышение их прочности и устойчивости. За счет этого должна быть достигнута требуемая проектная надежность автомобильной дороги. Высокая прочность основания позволяет увеличить срок межремонтной эксплуатации автомобильной дороги. Исследователями установлено, что при недостаточной устойчивости оснований, даже при хорошем уплотнении, высокая ровность покрытия быстро утрачивается, отсюда можно сделать вывод, что устойчивость основания напрямую влияет на ровность дорожного покрытия.

Наиболее современным и эффективным методом является укрепление слабых грунтов в основании методом глубинной стабилизации, которая представляет собой метод укрепления слабых грунтов путем добавления сухих или влажных вяжущих материалов способных связывать грунт и образовывать прочные камнеподобные массивы при этом позволяют ослабить усадки и усилить устойчивость насыпей для автомобильных дорог. Существуют два основных способа стабилизации грунта под насыпью:

- стабилизация колоннами,
- стабилизация массивом [3].

Мы проанализировали наиболее известные методы укрепления оснований и сравнили с методом глубинной стабилизации выделив при этом следующие преимущества и недостатки, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение методов укрепления оснований

№	Методы укрепления основания автомобильных дорог	Преимущества	Недостатки
1	Глубинная стабилизация слабых грунтов в основании	<ul style="list-style-type: none"> - Экономичность - Гибкость применения метода - Экономия материалов и энергоресурсов - Использование свойств местного грунта - Нет необходимости в транспортировке - Нулевая выработка грунта - Высокая производительность работ - Значительное улучшение свойств грунтов - Экологически чистый метод 	<ul style="list-style-type: none"> - Необходимо время для набора устойчивости насыпи - Не всегда применима для высоких насыпей - Не подходит для грунтов, слабо поддающихся стабилизации - Невозможность использования стабилизации колоннами в вечномерзлой зоне распространения грунтов
2	Замена слабого грунта основания	<ul style="list-style-type: none"> - Более выгодный при небольших объемах слабого грунта 	<ul style="list-style-type: none"> - Значительно больший расход грунтовых масс - Негативно влияет на окружающую среду - Большой объем земляных работ - Необходимость в транспортировке грунта - Проектная надежность ниже
3	Устройство свай	<ul style="list-style-type: none"> - Зачастую фундамент находится заметно глубже - Повышенная надежность - Более быстрый метод - Нет необходимости в транспортировке грунта 	<ul style="list-style-type: none"> - Более дорогостоящий - Усадки значительно отличаются от осадок окружающего грунта - Не актуален при большой протяженности участка дороги
4	Устройство вертикальных дренажей	<ul style="list-style-type: none"> - Экономичность - Осушение основание за счет ускоренной консолидации 	<ul style="list-style-type: none"> - Требуется больших затрат времени - Увеличенный расход грунтовых масс - Недостаточная устойчивость - Значительные усадки в ходе эксплуатации объекта - Нецелесообразно в плотных глинистых грунтах
5	Применение легких насыпей	<ul style="list-style-type: none"> - Экономичность 	<ul style="list-style-type: none"> - Целесообразно при небольшой протяженности участка - Большой объем земляных работ - Проектная надежность ниже чем у других методов

В таблице 1 приведены основные методы укрепления слабых грунтов основания автомобильных дорог, из которой можно сделать вывод, что глубинная стабилизация обладает большими преимуществами перед другими

методами и является более современным и эффективным способом стабилизации грунтов в основании.

Технология глубинной стабилизации подразумевает смешивание вяжущего материала подаваемого под давлением со слабым грунтом на месте производства работ по всей ширине насыпи на всю глубину распространения грунтов или ее часть. В зависимости от вида вяжущего и его состояния различают сухое и влажное смешивание. Учитывая, что слабые грунты, как правило, имеют повышенную влажность, то предпочтительным является применение сухого смешивания [3].

Укрепление может выполняться одним вяжущим материалом, комбинированием нескольких видов, вяжущим в сочетании с активными материалами и (или) инертными добавками. Вяжущие материалы могут быть гидравлическими или негидравлическими.

В качестве основных стабилизаторов могут применяться:

1. Цемент (марка не ниже 300);
2. Известь (жженая или гашеная);
3. Зола уноса (остатки процесса горения каменного угля, торфа и различного биотоплива);
4. Гипс строительный (марка не ниже Г10);
5. Высокоактивные и активные молотые гранулированные шлаки;
6. Другие инновационные добавки для стабилизации грунтов (полимерные эмульсии, битумно-полимерные композиции, полифилизаторы, концентрат полибонд, водная дисперсия стирол-бутадиенового полимера и др.)

Для оптимизации технических характеристик и экономии средств при обработке грунта применение вышеуказанных материалов возможно как раздельно, так и, путем получения композиционных составов с различным процентным соотношением вяжущего и грунта. Композиционные составы могут производиться в заводских условиях или смешиваться на месте с использованием стабилизационного оборудования [4].

Альтернативой применения дорогостоящего цемента и извести могут стать шлаки, зола уноса и нефелиновые шламы, обладающие гидравлическими свойствами. Эти материалы являются неисчерпаемыми отходами теплоэнергетической и металлургической промышленности.

С ужесточением экологических требований предъявляемые к организации и содержанию шламовых полей, утилизации и захоронению таких отходов вопрос их применения становится наиболее актуальным. Отрасль строительства автомобильных дорог является максимально материалоемким потребителем отходов промышленности, а применение их в качестве стабилизаторов позволяет расширить сырьевую базу, упростить технологический процесс производства работ, использовать местные грунты в качестве дорожно-строительного материала, существенно удешевить дорожное строительство и освободить площади, занимаемые отвалами и не используемые рационально.

Однако технология укрепления слабых грунтов основания методом глубинной стабилизации с применением комплексных стабилизаторов тре-

бует индивидуального исследования и проектирования составов грунтовых композитов, разработки технологии использования с учетом физико-механических характеристик грунтов на объекте строительства и доступности сырьевой базы.

Список использованных источников

1. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. Москва, 2004.
2. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85*.
3. СТО СРО 083-029ЕН-2011 «Разработка и реализация методов стабилизации слабых грунтов органического происхождения».
4. ОДМ 218.2.063-2015 «Рекомендации по применению технологии глубинного смешивания для укрепления слабых грунтов оснований земляного полотна».
5. Крафт С.Л. Формирование радиационных показателей в процессе гидрозолоудаления и хранения золошлаковых отходов Буроугольных ТЭС: автореферат на соис. уч. степени к.г.н. Томск, 2010. 23 с.

ТЕХНОЛОГИЯ УКРЕПЛЕНИЯ СЛАБЫХ ГРУНТОВ МЕТОДОМ ГЛУБИННОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ

Ф.С. Потылицин

Научный руководитель - Артемьева Н. А.

кандидат технических наук

Сибирский Федеральный Университет

Инженерно-строительный институт

Строительство автомобильных дорог относится к сложным технологическим процессам, на качество которых оказывает влияние множество факторов. Основными из них являются природно-климатические и грунтово-геологические условия. Большая часть Российской Федерации расположена в зоне с холодным и очень холодными климатическими условиями. Для таких зон характерны грунтовые основания отличающиеся болотными, заторфованными, переувлажненными грунтами. Такие грунты принято называть слабыми.

Слабые грунты, под действием сложных климатических условий и высоких нагрузок негативно влияют на надежность дорожных конструкций в целом. Влияние свойств слабых грунтов, таких как водонасыщенность, высокая влажность, большая пористость и сжимаемость приводит к деформациям земляного полотна и основания, что влияет на безопасность движения, пропускную способность и эксплуатационные показатели автодорог. [1]

Уменьшить воздействие климатических условий и транспортных нагрузок практически невозможно. Поэтому, исключить вышеперечисленные деформации можно либо путем улучшения характеристик имеющегося слабого грунта, либо путем замены грунтового массива, что обычно является традиционным способом при производстве работ.

Традиционный способ включает в себя стандартный набор технологических операций по замене слабого грунта основания земляного полотна на грунт с улучшенными характеристиками, который способен обеспечить требуемую несущую способность и нормальную работу земляного полотна в процессе эксплуатации. Но такой способ не является безальтернативным.

Одним из альтернативных способов является метод глубинной стабилизации слабого грунта, который позволяет получить стабильные физико-механические характеристики грунта путем добавления некоторого количества сухих или влажных материалов непосредственно в грунт с последующим его перемешиванием на определенную глубину, планированием и уплотнением.

Известно, что для стабилизации используются как традиционные (цемент, известь, гипс), так и инновационные материалы (специальные добавки), а также отходы промышленности (шламы, шлаки, золы уноса и др.).

Для стабилизации с экономической и экологической точки зрения рационально использовать отходы промышленности, такие как шлаки, золы уноса и нефелиновые шламы, обладающие гидравлическими свойствами. Эти

материалы являются неисчерпаемыми отходами теплоэнергетической, металлургической, горной промышленности и имеют очень низкую стоимость по сравнению с цементами, известью и инновационными добавками.

После изучения основных характеристик объекта исследования, проводят лабораторные испытания со слабыми грунтами и стабилизаторами. На основе сравнительного анализа выбирают такой стабилизатор, который будет наиболее выгоден с точки зрения транспортировки, производства работ и по качественно-ценовым показателям.

Для укрепления слабых переувлажненных грунтов верхней части основания рационально использование технологии стабилизации грунтов «массивом», т.е. сухого смешивания слабого грунта со стабилизатором с помощью технологического оборудования на заданную глубину и всю ширину основания автомобильной дороги. [2]

Тогда, технологический процесс укрепления слабых грунтов основания методом глубинной стабилизации в данном случае можно представить из следующих технологических операций:

- 10) Подготовка строительной площадки, корчевка пней и т.д.;
- 11) Снятие почвенно-растительного слоя грунта с помощью бульдозера;
- 12) Геодезические работы и снятие черных отметок земли;
- 13) Разбивка поверхности слабого грунта на участки для стабилизации;
- 14) Разравнивание поверхности земли автогрейдерами или бульдозерами;
- 15) Транспортировка стабилизатора на место производства работ и выгрузка его в бункеры или непосредственно на поверхность слабого грунта;
- 16) Распределение стабилизатора в определенном по методике соотношении к объему грунта на местности с помощью бульдозера или дозатора с бункером;
- 17) Смешивание материала со слабым грунтом на нужную глубину с помощью самоходного экскаватора со шнековым смесителем или фрезой (рис. 1);
- 18) Профилирование перемешанного грунта;
- 19) Уплотнение основания с помощью катков до требуемой плотности.



Рис. 1 – Шнековый смеситель экскаватора и фреза роторная [4]

После проведения работ по уплотнению укрепленного основания земляного полотна необходимо выдержать время на консолидацию и набора несущей способности грунтов. Далее проводят повторные испытания стабилизированного основания и контроль качества выполненных работ.

Контроль качества работ, согласно методике, обеспечивается за счет проведение входного контроля, контроля хода проведения работ, технологии и контроля технологических параметров укрепления (количество вяжущего, глубина смешивания и т.д.). [2]

После производства работ проводят обязательный операционный контроль качества укрепленного грунта, в ходе которого определяют плотность, влажность, проводят оценку и сравнение полученного значения предела прочности при сжатии с проектным значением. Так же могут быть проведены испытания на сдвигоустойчивость, водопроницаемость, водонасыщение. [3]

Качество образцов укрепленного грунта считается обеспеченным, если не более 10 % исследуемых образцов имеют 5%-ное отклонение прочности (в меньшую сторону) от требуемого проектного значения. При положительных результатах, продолжают дальнейшие работы по строительству. [2]

Смешивание верхнего слоя основания рационально производить с помощью экскаватора по методу заранее размеченных участков в виде блоков и последовательным перемещением от одного участка к другому. (Рис. 2)



Рис. 2 – Метод блочной стабилизации грунта

Перемешивание грунта с стабилизатором производится путем перемещения роторной фрезы сверху вниз и справа налево по челночной схеме по всей площади размеченного блока до полной гомогенизации массы грунта в блоке. Схема может корректироваться в зависимости от свойств грунта. [2]

Рассмотрим типовой поперечный профиль устроенной в насыпи автомобильной дороги III категории при использовании вышеописанного метода.

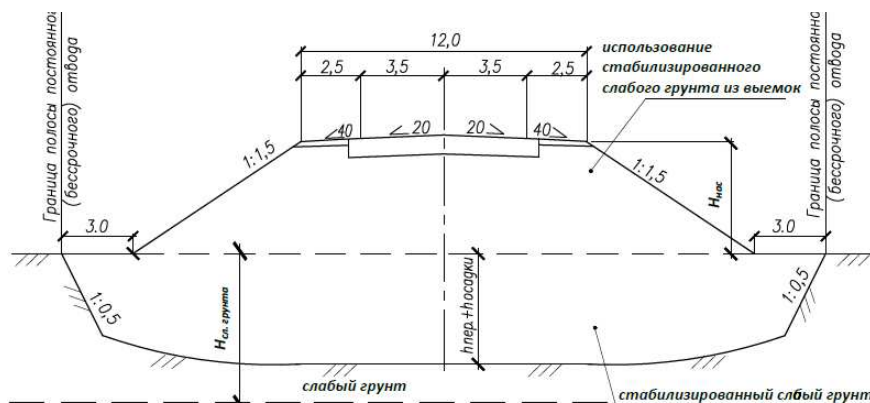


Рис. 3 – Поперечный профиль автодороги III категории

Стабилизация позволяет снизить транспортные расходы и объем земляных работ. При этом объем работ по устройству дорожной одежды, обочин и откосов остается таким же, как и в традиционном методе. Кроме того, появляется возможность использовать стабилизированный местный грунт при строительстве насыпи земляного полотна.

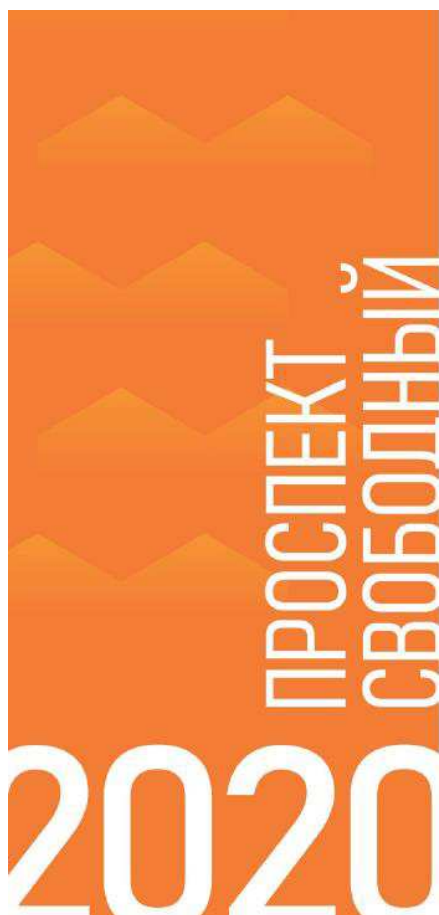
Список литературы

1 Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах, Москва, 2004г;

2 ОДМ 218.2.063-2015 «Рекомендации по применению технологии глубинного смешивания для укрепления слабых грунтов»;

3 СТО СРО 083-029ЕН-2011 «Разработка и реализация методов стабилизации слабых грунтов органического происхождения»;

4 <https://www.tradicia-k.ru/catalog/frezy-rotornye>.



ПРОСПЕКТ СВОБОДНЫЙ
МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «ПРОСПЕКТ СВОБОДНЫЙ – 2020», посвященная Году памяти и славы (75-летию Победы в Великой Отечественной войне 1941-1945 годов)

Институт: Инженерно-строительный институт

Секция: Городские инженерные сооружения, автомобильные дороги, основания и фундаменты

СЕРТИФИКАТ очного участия
в конференции

Потылицин Федор Сергеевич

участник Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Прспект Свободный – 2020», составившейся в формате Digital (онлайн) с 20 апреля по 18 мая 2020 года, г. Красноярск

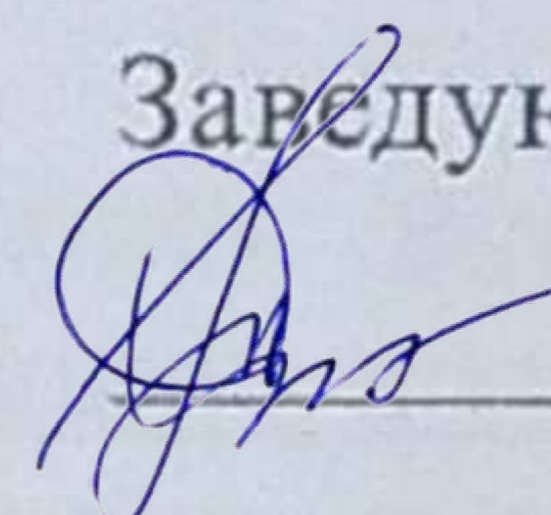
Секретарь конференции

С.К. Франчук

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Инженерно-строительный институт
Кафедра автомобильных дорог и городских сооружений

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 В.В. Серватинский

« 27 » июня 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Укрепление слабых грунтов основания автомобильных дорог методом
глубинной стабилизации

тема

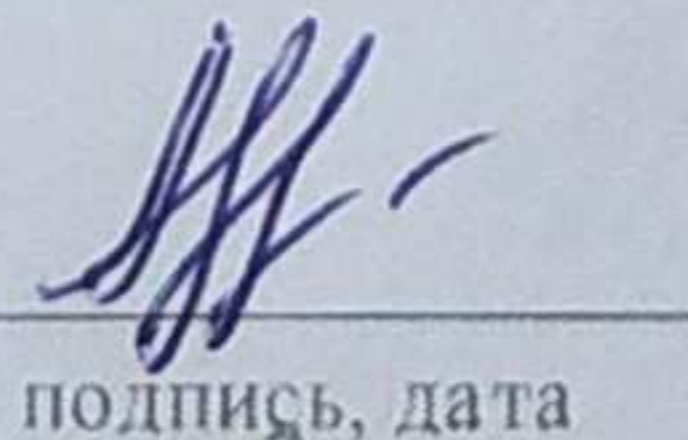
08.04.01. Строительство

код и наименование направления

08.04.01.11. Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных
сооружений в суровых природно-климатических условиях Сибири

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель


подпись, дата

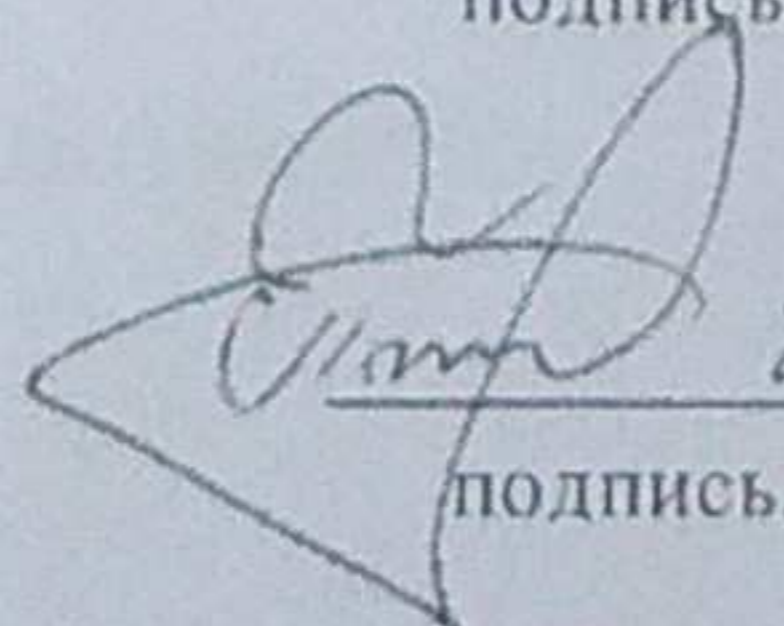
к.т.н., доцент

должность, ученая степень

Н.А. Артемьева

инициалы, фамилия

Выпускник

 23.06.2020г.
подпись, дата

Ф.С. Потылицин

инициалы, фамилия

Красноярск 2020