

ГУШОСДОР НКВД СССР
ДОРОЖНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ

В. М. БЕЗРУК и А. И. ЛЫСИХИНА

ОСНОВЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

ДОРИЗЛАТ
МОСКВА 1944 г.

Канд. геолого-минер. наук В. М. БЕЗРУК и
канд. техн. наук А. И. ЛЫСИХИНА

№ 183/53.

ОСНОВЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Отв. редактор проф. *Н. Н. Иванов.*

Л 100330. Поступило в пр-во	Подписано в печать 25/X—44 г.
Объем 5 ¹ / ₈ печ. л.	Авт. л. 6,5. Знаков в печатном листе 46.224
Тираж 3000 экз. Цена 6 р.	Формат бумаги 84×108 ¹ / ₃₂ . Заказ № 2374.

Загорская типография

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проблема использования грунтов как местных дорожно-строительных материалов в настоящее время практически разрешена на опыте постройки многих сотен километров грунтовых и дорожных покрытий и оснований как у нас в Советском Союзе, так особенно в США и других странах.

В настоящее время использование грунта в качестве основного материала для строительства дорог приобретает исключительное значение, ибо в этом случае отпадает необходимость в завозе на трассу больших количеств каменных или гравийных материалов.

Если учесть, что для постройки дорог с каменной одеждой потребуется на километр дороги от 600 до 1000 кубометров камня, который зачастую необходимо привозить за многие десятки и даже сотни километров, то сразу становится ясным, какое огромное количество железнодорожного и автогужевого транспорта освобождается при замене камня местным грунтом.

При умелом использовании грунта быстрая постройка достаточно прочных и дешевых дорожных покрытий и оснований становится возможной и общедоступной.

В послевоенный период учитывая большой масштаб восстановления и строительства дорог, а также строительство аэродромов и гражданских зданий, область применения грунтов как дорожностроительных материалов должна быть еще более расширена.

В настоящей книге излагаются основные теоретические и производственные принципы стабилизации грунтов в дорожном строительстве. В ней дается синтез руководящих положений и основных методов обработки грунтов, подвергнутых многолетней проверке как в лабораторных условиях, так и на производстве в широких масштабах в СССР, США и других странах.

Излагаемые в книге принципы стабилизации грунтов дадут возможность нашим производственникам ознакомиться с основами обработки грунтов. Многие положения должны явиться отправными и руководящими при дальнейшей разработке методов стабилизации грунтов.

Введение, главы I, IV и V написаны кандидатом геолого-минералогических наук Б. М. Безрук.

Глава II—доктором технических наук проф. Н. Н. Ивановым.

Глава III—кандидатом технических наук А. И. Лысихиной. Раздел этой главы «Физико-химические процессы при обработке грунтов органическими вяжущими материалами» написал А. И. Лысихиной совместно с Л. Н. Ястребовой.

Директор ДОРНИИ Гушосдора НКВД СССР

доктор технических наук профессор *Н. Н. Иванов*

ВВЕДЕНИЕ

С ростом автомобильного движения возникла потребность в создании многих сотен и тысяч километров устойчивых дорог. Темпы роста автомобильного движения в ряде стран (СССР, США, Англия и др.) за последние два десятилетия были настолько велики, что перед дорожными организациями была поставлена трудно разрешимая задача — строить автомобильные дороги дешево и быстро с использованием в максимальной степени местных материалов и, в частности, грунтов.

Совместными усилиями целого ряда исследователей выход был найден. После проведения исследовательских работ были разработаны эффективные и дешевые методы строительства дорог, базирующиеся на принципе самого широкого и разностороннего использования грунтов в качестве строительного материала, как для оснований, так и в ряде случаев для дорожных покрытий.

Плодотворная идея использования грунтов как местных дорожностроительных материалов за последние 20 лет подверглась строгой критике и проверке в производственных условиях. Успехи, имеющиеся в этой области, настолько велики и очевидны, что сами говорят о жизненной необходимости и впредь как можно шире использовать грунты в качестве основного материала для устройства дорожных покрытий и оснований.

Современные методы дорожного строительства целиком базируются на принципе: прочность и устойчивость дорожных покрытий всецело зависят от прочности и устойчивости основания. Практический опыт свидетельствует о том, что нельзя создать прочное покрытие на слабом основании. Наоборот, даже слабое и тонкое покрытие удовлетворительно работает на прочном, устойчивом основании. Из этого следует сделать вывод, что все мероприятия по созданию устойчивых и прочных оснований должны занимать центральное место в вопросах дорожного строительства.

Молодая наука — грунтоведение — открыла новые перспективы для дорожного строительства. В настоящее время раз-

работаны методы активного воздействия на грунты, позволяющие регулировать и повышать механическую устойчивость грунтов.

Этим самым создана прочная база для использования грунтов как исходных дорожностроительных материалов. Используя грунты, дорожники-строители получают в свое распоряжение в неограниченном количестве такой местный материал, который обходится во много раз дешевле других, применяемых в дорожном строительстве, материалов (каменья, гравия, щебня и др.).

Таким образом, при использовании грунта в строительстве дорожных покрытий и оснований сочетаются два благоприятных фактора: во-первых, из обработанных грунтов могут быть созданы дорожные покрытия или основания, отвечающие техническим требованиям современных автомобильных дорог; во-вторых, использование грунтов как местных строительных материалов с экономической стороны представляется весьма выгодным, так как грунт является наиболее дешевым и наиболее доступным материалом, не требующим больших затрат на транспортировку и разработку.

К этому следует добавить, что при обработке грунтов широко используются обычные дорожные и сельскохозяйственные машины, что является немаловажным фактором, обеспечивающим строительство дешевых дорог в весьма сжатые сроки.

Последние годы в дорожном и аэродромном строительстве характеризуются широким внедрением в производство различных методов искусственного укрепления грунтов как в основаниях, так и в покрытиях. Методы эти весьма разнообразны и неодинаковы по своей эффективности.

Современные представления о физико-химических явлениях, происходящих в грунтах, позволяют утверждать, что вредные в дорожном отношении свойства грунтов можно устранить или уменьшить, подвергая грунт различного рода химическим и физическим воздействиям либо технологической обработке. Общей руководящей идеей во всех методах обработки грунтов является принцип активного воздействия на глинисто-коллоидальную часть грунта, являющуюся наиболее неустойчивой его частью.

Предметом настоящей книги и является научное освещение основных методов обработки грунтов, базирующихся на принципе активного воздействия на грунты путем изменения свойств его высокодисперсной части и использования положительных свойств, заложенных в самом грунте, в результате чего повышается устойчивость их как в основании, так и в покрытии, в любых условиях увлажнения.

Г Л А В А I

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ

1. Краткие сведения о грунтах как дисперсных системах

Для правильного понимания применяемых в дорожном строительстве методов обработки грунтов целесообразно в кратких чертах обрисовать основные теоретические положения, касающиеся оценки физико-механических и физико-химических свойств грунтов как строительных материалов.

В настоящее время грунты принято рассматривать как твердые дисперсные системы, свойства которых определяются законами дисперсного состояния вещества, рассматриваемыми коллоидной химией.

При рассмотрении грунта как твердой дисперсии одной из характерных его особенностей является то, что грунт состоит из более или менее значительного количества твердых частиц, соприкасающихся, в зависимости от того, сухой грунт или нет, с воздухом или водой, или же одновременно с обоими этими веществами, находящимися в промежутках между твердыми частицами. Таким образом, грунт всегда представляет собой по меньшей мере двухфазную, а как правило, трехфазную систему.

Уже одно свойство многофазности может служить указанием на многообразие возможных в грунте, как дисперсионной системе, реакций и равновесий. Это свойство усиливается в значительной степени еще тем, что грунты, представляют системы, состоящие из частиц различной величины, носящие название полидисперсных.

В подавляющем большинстве случаев всякий грунт содержит частицы, главным образом минерального происхождения самых различных размеров, начиная от галек и крупных песчаных частиц и кончая мельчайшими глинистыми частицами, величина которых представляет постепенный переход от более грубых частиц (0,005 мм) к частицам молекулярных размеров через коллоидальные частицы.

Класс коллоидных веществ, имеющих размер частиц от 0,1 микрона до 1 миллимикрона, всеми своими свойствами включается между классами максимально дисперсных (тонко

раздробленных) и грубо дисперсных систем, причем свойства всех их в направлении:

максимальная дисперсность → коллоидная дисперсность → грубая дисперсность

либо последовательно возрастают, либо понижаются, или же достигают в группе коллоидных систем своего максимума или минимума.

Коллоидное состояние вещества рассматривается теперь не как принципиально нечто новое по сравнению с состоянием вещества в грубой или максимальной дисперсности, а лишь как количественно отличное по своим свойствам. Таким образом, термин «коллоидный» не является химическим понятием, а служит для обозначения состояния вещества. В принципе каждое вещество может быть переведено в коллоидное состояние либо путем диспергирования, либо же, наоборот, путем укрупнения его частиц.

Присутствующие в грунте частицы коллоидальных размеров также образуются двояким путем: путем диспергирования (распыления) составляющих грунт гранулометрических элементов под влиянием процессов выветривания и почвообразования, либо путем коагуляции (свертывания) золь коллоидных растворов кремнекислоты, гидрата окиси железа и алюминия, гумусовых веществ и др., также образующихся в грунте под влиянием указанных выше процессов.

Работы академика К. К. Гедройца, д-ра Г. Вигнера, проф. Фагелера и др. показывают, что для химических взаимодействий твердого вещества единственно важной является величина поверхности раздела между твердой фазой и окружающей ее жидкой или газообразной фазой, отнесенная к единице объема или же веса твердого вещества, известная под наименованием удельной поверхности (см^2 на 1 г. грунта).

Как сильно повышается величина удельной поверхности вещества по мере уменьшения величины его частиц, показывает следующая таблица (составленная Оствальдом).

Таблица 1

Увеличение поверхности куба при раздроблении

Длина стороны куба	Число кубиков	Общая поверхность
1 см	1 ¹	6 см^2
0,1 мм	10 ⁶	600 см^2
1 микрон	10 ¹²	6 м^2
0,01 микрона	10 ¹⁸	600 м^2
0,1 миллимикрона	10 ²⁴	60000 м^2
0,0001 миллимикрона	10 ³⁰	6 км^2

По вычислениям, произведенным по формулам Цункера, удельная поверхность для отдельных фракций грунта будет выражаться в следующих величинах:

Т а б л и ц а 2

Наименование фракций	Диаметр частиц (в мм)	Удельная поверхность (в см ² на 1 г грунта)
Песок крупный	2—0,2	44,6
Пыль	0,2—0,002	4 458
Глина	0,002—0,0001	2 990 000
Ультраглина	0,0001—0,000001	9 890 000

Из приведенных в табл. 1 и 2 данных следует, что коллоидная фракция, составляя в грунте всего лишь несколько процентов, по общей и удельной поверхности этой фракции во много раз будет превосходить поверхность всей остальной массы грунта. Так как взаимодействие грунтовых частиц с окружающей их средой или же с вносимыми в грунт вяжущими веществами происходит только на их пограничной поверхности или поверхности соприкосновения с жидкой фазой, то становится вполне понятным огромное значение коллоидной части грунта как главной арены, на которой и будут происходить все процессы взаимодействия грунта и вяжущих веществ в случае обработки его последними.

Приведенные выше расчеты показывают, что удельная поверхность наиболее мелких фракций измеряется десятками тысяч квадратных метров в одном грамме грунта и в сравнении с этой величиной суммарная поверхность всех остальных более крупных фракций грунта сводится почти к нулю.

Все вместе взятое с большой отчетливостью демонстрирует совершенно исключительное значение мельчайших фракций как в грунтовых процессах, так и в комплексе общих свойств грунта.

Подчеркивая особо важное значение в свойствах грунта его глинисто-коллоидальной части, не следует забывать, что грунт в целом представляет собой в одно и то же время грубодисперсную и коллоидодисперсную систему, так как может иметь в своем составе частицы как в максимально дисперсном состоянии, так и в довольно крупном виде, свойства которых в качественном отношении подчиняются одним и тем же законам и изменяются лишь с количественной стороны.

Преобладание грубодисперсных, например, песчаных, или, наоборот, тонкодисперсных частиц обуславливает собой

все многообразие физико-механических и физико-химических свойств грунтов.

Грунты представляют собой обратимую дисперсную систему, степень дисперсности которой изменяется под влиянием увлажнения, присутствия электролитов или других причин.

Используя это качество грунта, можно путем введения различных вяжущих веществ переводить обратимые свойства в необратимые, т. е. положительные в строительном отношении свойства грунта делать устойчивыми, стабильными во всех случаях.

Так как тонкодисперсная коллоидная часть обладает наибольшей активностью и обратимостью своих свойств с одной стороны, а с другой стороны, вносимые в грунт при обработке вяжущие материалы, как-то: битумы, дегти, цемент, известь и др., представляют собой также дисперсные коллоидные системы, то пути воздействия на строительные свойства грунта намечаются сами собой.

В искусственном регулировании свойств грунтов, активному воздействию на глинисто-коллоидальную часть принадлежит решающая роль.

2. Поглотительная способность грунтов и ее влияние на их строительные свойства

Под влиянием длительного действия тепла, воздуха, влаги, растительного и животного мира на минералы, составляющие горные породы, происходят резкие изменения в минеральной части горных пород (выветривание). В результате этих процессов в грунтах происходит накопление коллоидально-раздробленных соединений как путем диспергирования (раздробления), так и путем конденсирования—коагуляции (свертывания).

Наиболее характерной чертой этой наиболее дисперсной части грунта является способность задерживать (поглощать) растворенные или взмученные в воде вещества.

Такое свойство принято называть в грунтоведении поглотительной способностью грунта, а часть грунта, обладающего в резко выраженной форме свойством задерживать другие вещества, именовать поглощающим комплексом грунта.

Детальное ознакомление с поглощающим комплексом показывает, что он состоит из:

1) частиц тонко раздробленных первичных и вторичных минералов;

2) продуктов распада этих минералов, в том числе из глины;
4) гумусовых веществ, главным образом в форме гуматов
3) различных соединений (комплексов), возникших от взаимной коагуляции коллоидов;
и других органо-минеральных соединений.

С физической стороны поглощающий комплекс — это наиболее мелкая по составу гранулометрических фракций часть грунта, являющаяся одним из главных естественных цементов в грунте.

Поглощающий комплекс — это наиболее динамичная и активная часть грунта. Даже при минимальном содержании коллоидов их динамика играет решающее значение, независимо от общего гранулометрического состава грунта. Было бы неправильным, говоря о поглощающем комплексе и о его свойствах, предполагать, что они являются чем-то обособленным, не связанным органически с остальной более грубодисперсной массой грунта. Наоборот, только рассматривая грунт в целом со стороны проявления им поглощательных свойств, можно прийти к правильному теоретическому и практическому выводу.

Поглотительная способность грунтов, т. е. свойство грунта задерживать растворенные или взмученные вещества, — явление, присущее в большей или меньшей степени всем грунтам. Впервые это свойство было подмечено Гагнери в 1819 г. Оно оказалось настолько практически значительным и теоретически важным, что послужило толчком к проведению глубоких исследований, продолжающихся и по сей день как у нас в СССР, так и в других странах.

Явления, связанные с поглотительной способностью, получили правильное и глубокое освещение в классических работах академика Гедройца, д-ра Вигнера, д-ра Фагелера, Хиссинга и др. Благодаря этим работам было правильно оценено и практически использовано это свойство как мощный рычаг к искусственному регулированию физических свойств грунтов.

Значение поглотительной способности с точки зрения строительных свойств грунта было развито и изучено в работах Филатова, Охотина, Панкова, Гогентоглера, Винтерюрна и др.

Среди различных видов поглотительной способности грунтов (механической, физической, физико-химической, химической) наибольший практический и теоретический интерес представляет физико-химический вид поглощения, который в основном характеризуется способностью грунтов изменять поглощенные им ионы на ионы растворяемых, приходящих в соприкосновение с грунтом. Обменное

поглощение в грунтах может иметь место как в отношении катионов, так и анионов.

Физико-химическое поглощение, как показали работы академика Гедройца, присуще главным образом частицам менее 0,005 мм, т. е. глинистым и коллоидальным. Более крупные частицы хотя также обладают этим свойством, однако в количественном выражении обмен и поглощение происходят в очень слабой степени.

В реакциях физико-химического поглощения и обмена катионов по электрохимической теории, развитой Фагелером, участвует не вся масса грунтовой частицы большей или меньшей крупности, а лишь отдельные ее точки (см. схематич. рис. 1). Таким образом, с электрохимической точки зрения

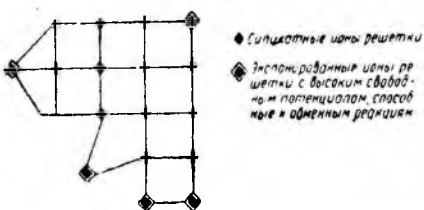


Рис. 1. Часть кристаллической решетки коллоидной частицы

частица, если только она обладает на углах, ребрах или поврежденных местах пространственных решеток остаточными валентностями, способна обнаруживать явления поглощения.

Процесс образования экспонированных точек, т. е. нарушенных пунктов кристаллической решетки, обладающих свободной энергией поглощения, особенно интенсивно должен происходить на ребрах кристаллов пластинчатой формы.

Действительно, по данным Дабреску, слюды, благодаря их пластинчатой структуре, обнаруживают большую способность к обмену катионов, даже при значительной величине зерен. К числу носителей описываемых свойств грунта в первую очередь относятся те из порообразующих минералов и их остатков, которые обладают ионной кристаллической решеткой. Кроме слюд, такими минералами будут полевые шпаты, лейцит, нефелин, пироксены, амфиболы и др.

В зависимости от того, какие катионы преобладают в поглощающем комплексе, происходит изменение физических и механических свойств грунта.

Так, например, нахождение в поглощающем комплексе катиона натрия придает грунту большую связность и плотность в сухом состоянии. При увлажнении такой грунт характеризуется большой липкостью и пластичностью и почти полным отсутствием водопроницаемости. Присутствие поглощенного натрия вызывает переход коллоидной части грунта в состояние высокой дисперсности и большой гидрофиль-

ности, что вызывает большое набухание и быстрое размокание при сильном увлажнении грунта.

Указанными свойствами характеризуются солонцы и солонцеватые грунты.

У грунтов с поглощающим комплексом, насыщенным кальцием и магнием, как, например, у черноземов, коллоидная часть находится в свернутом состоянии, чем и объясняется наличие прочной зернистой структуры у чернозема. Дисперсность и гидрофильность таких грунтов проявляются при увлажнении в меньшей степени, чем у грунтов, насыщенных натрием.

Представление о колебании физических и механических свойств грунта в зависимости от рода поглощенных катионов дают данные, приведенные в табл. 3.

Для изучения нами специально были подготовлены, путем внесения кварцевых частиц различной крупности, грунты, идентичные по своему макрогранулометрическому составу, но с различным составом поглощенных катионов.

Таблица 3

Влияние поглощенных оснований на физико-механические свойства грунтов

Наименование грунта	Гранулометрический состав в %			Врем. срабаты- вания ската в кг/см ²	Число набухания	Число пла- стичности	Скорость размокания в мин.
	0,25— 0,05	0,05— 0,005	< 0,005				
Чернозем обыкновен. (гор. А ₁) преобла- дает поглощ. Са	3,53	75,14	21,33	84	123	25,9	31
Подзолистый грунт (гор. В ₂) преобла- дает поглощен. Н	"	"	"	143	75	23,6	62
Солонец корково- столбчатый (гор. В ₁) преобладает пог- лощ. Na	"	"	"	190	191	28,2	110

Данные, приведенные в табл. 3, весьма показательны и говорят о большом влиянии состава поглощенных катионов на физические и механические свойства грунтов. Они свидетельствуют об ограниченном значении гранулометрического состава, ибо грунты, совершенно аналогичные по содержанию частиц, но различные по физико-химическому состоянию

глинисто-коллоидальных фракций, обладают резко отличающимися между собой свойствами.

В суммарном эффекте улучшения дорожных свойств грунтов, обработанных различными вяжущими материалами, помимо физико-химического поглощения, может иметь место как физическое, так и химическое поглощение. Последний вид поглотительной способности имеет место тогда, когда поступающие в грунт растворы или вещества могут давать с грунтовыми частицами нерастворимые или трудно растворимые соединения. На химическом поглощении основано, например, укрепление грунта неорганическими вяжущими материалами — цементом, известью, силикатом и др.

Рассматривая каждый вид поглотительной способности в отдельности и изучая его особенности, не следует забывать, что в производственных условиях обработки грунтов мы будем иметь смешанный вид поглощения грунтом вносимых вяжущих веществ. Лишь в отдельных случаях в чистом виде будет преобладать тот или иной вид поглощения.

Изменения физико-химических и механических свойств обработанного грунта будут в подавляющем большинстве случаев обуславливаться в суммарном виде вяжущими свойствами вносимых добавок и качеством обрабатываемого грунта.

3. Отношение грунта к воде и водным растворам

Поверхностные грунты в естественном залегании представляют собой всегда трехфазную систему: грунт + вода + + воздух. Содержание последних двух компонентов весьма динамично и может колебаться от долей до десятков процентов. От степени увлажнения грунта зависят его физико-механические свойства. В зависимости от количественного содержания воды грунт может резко изменять свою консистенцию и переходит из устойчивого состояния в неустойчивое. Вот почему изучению процессов взаимодействия грунта с водой всегда уделялось и уделяется теперь большое внимание. В настоящее время в этом вопросе существует известная ясность, чему во многом способствовали классические работы проф. А. Ф. Лебедева.

Вода, встречающаяся в грунте, по Лебедеву, разделяется на химически связанную, физически связанную и свободную воду.

В зависимости от того, в какой форме находится вода, связный грунт приобретает ту или иную консистенцию. Последняя по классификации Аттерберга может быть: твердой, пластичной, текучей. Пластичная консистенция в свою оче-

Редь разделяется на твердо-пластичную и мягко-пластичную.

Твердая и твердо-пластичная консистенция грунта обуславливается наличием физически связанной воды, причем при твердо-пластичной консистенции появляется уже некоторое количество свободной воды. Возрастаанием количества свободной воды объясняется значительная потеря несущей способности грунта при переходе его из твердо-пластичной в мягко-пластичную консистенцию.

Количество физически связанной и свободной воды в грунтах может резко меняться под влиянием целого ряда климатических и естественно-исторических факторов. Динамичность в количественном содержании этих категорий воды и обуславливает собой все разнообразие свойств грунта.

Так, например, при влажности, равной полной гигроскопичности, отношение толщины водных оболочек вокруг коллоидной частицы, в зависимости от насыщения одно-, двух- или трехвалентными катионами, равно $1000 : 500 : 320$ (в ангстремах), а объемы частиц меняются соответственно этому как $2,13 : 1,24 : 1$. При большей влажности, когда частички окружены уже жидкой водой, толщина водной оболочки для аналогичных случаев меняется и соотношение равно $4500 : 2250 : 1140$ ангстремов, а разница между объемами частиц еще более значительна — $6,7 : 1,88 : 1$.

Такое увеличение водной оболочки коллоидов неизбежно влечет за собой набухание всей массы грунта, особенно насыщенного натрием.

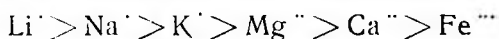
Толщина водных оболочек вокруг частиц, насыщенных катионом натрия, в несколько раз превышает толщину оболочек, наблюдаемую при насыщении грунта другими катионами (двух- или трехвалентными, например, Ca^{++} или Fe^{++}).

Гидратационная оболочка, облегающая грунтовые частицы, представляет собой физически связанную воду, т. е. воду, обладающую повышенной вязкостью. С увеличением толщины гидратационной оболочки уменьшается величина свободных пор грунта, что приводит к очень значительному уменьшению фильтрационной способности такого грунта. На этом свойстве основан новый метод борьбы с фильтрацией грунтов, предложенный академиком А. Н. Соколовским¹. Сущность этого метода заключается в обработке грунта хлористым натром, что приводит в конечном счете к насыщению грунта катионом Na, который, находясь в поглощенном состоянии, проявляет указанные выше свойства.

¹ Акад. А. Н. Соколовский. Новый метод борьбы с фильтрацией почв. Сельхозгиз, 1941.

В соответствии с электрохимической теорией Фагелера гидратационные свойства поглощенных катионов резко отличаются между собой, что и сказывается на физических и водных свойствах грунта.

По степени влияния гидратации частиц на количество физически связанной воды поглощенные катионы могут быть расположены в следующий ряд Гофмейстера:



Работами проф. Охотина и Панкова установлено, что между физико-химическим состоянием грунта, количеством физически связанной воды и физико-механическими свойствами грунта обнаруживается определенная связь.

Как было указано выше, физически связанная вода распределяется в грунте в виде очень тонких пленок, причем свойства этой категории воды отличаются от свойств обычной воды.

Физически связанная, или адсорбированная, вода характеризуется большей плотностью (она близка к 2) и вязкостью. Благодаря силам молекулярного притяжения молекулы адсорбированной воды ориентированы определенным образом на поверхности грунтовых частиц. Указанная категория воды образует на частицах грунта пленку, внешняя граница которой определяется пределом действия молекулярных сил твердой фазы грунта. Чем больше удаленность от поверхности частицы, тем меньше разница между свойствами адсорбированных водных пленок и обычными свойствами свободной воды.

Как было указано выше, наиболее активной и чувствительной ко всяким реакциям обмена является тонкодисперсная глинисто-коллоидальная часть грунта. Отсюда процессы поглощения физически связанной воды будут преимущественно связаны с этой именно частью грунта.

Таким образом, физически связанная вода является положительным фактором, обуславливающим устойчивое состояние грунта. Отсюда следует, что всякие мероприятия, приводящие к сохранению в грунте этой категории воды или же переводящие свободную воду в физически связанную, в конечном итоге будут являться мероприятиями, повышающими устойчивость грунта в дороге. Как будет указано ниже, в системе мероприятий по укреплению грунтов использование положительных свойств физически связанной воды занимает одно из центральных мест.

На основе учета положительных свойств физически связанной воды в США в 1933 г. инженером Проктором были проведены исследования, освещающие вопросы уплотнения

связных грунтов. Этими работами впервые была правильно освещена физическая сторона процессов уплотнения грунтов и был дан толчок к более углубленному и разностороннему изучению вопросов, связанных с определением факторов устойчивости грунтов.

Инженером Проктором впервые было введено понятие об «оптимальной» влажности уплотнения грунта, т. е. влажности, при которой можно достигнуть максимальной плотности грунта при наименьшей затрате силы на уплотнение.

Последующими работами, проведенными проф. Ивановым, а также на строительстве канала Москва-Волга было установлено, что максимальная устойчивость связного грунта может быть обеспечена лишь при условии уплотнения его до максимальной плотности при оптимальной влажности, соответствующей данному грунту.

При этом следует отметить, что при «оптимальной» для уплотнения грунта влажности вода находится на пределе перехода ее из категории физически связанной в категорию свободной воды, и в количественном выражении указанная оптимальная влажность равна или близка к границе раскатывания (нижний предел пластичности) уплотняемого грунта.

При оптимальной влажности связные грунты находятся на грани перехода из твердой в твердо-пластичную консистенцию и характеризуются таким состоянием, при котором грунт способен еще выдерживать довольно большую нагрузку, без образования значительных деформаций. Оптимальная влажность обуславливает собой все положительные свойства грунта, благоприятные с точки зрения дорожного строительства. В указанном состоянии грунты весьма устойчивы и связны, не обладают свойством липкости и не способны к пылеобразованию. Легко разрабатываются и вместе с тем легко уплотняются при укатке.

Обуславливая собой многие положительные свойства, оптимальная влажность вместе с тем характеризует собой критическое состояние грунта. При дальнейшем увлажнении наряду с наличием физически связанной воды в грунте появляется свободная вода, которая, способствуя раз'единению и размягчению грунта, вызывает появление отрицательных дорожных свойств—малую связность, набухание, большую липкость и пластичность (рис. 2).

С появлением в грунте свободной воды последний переходит вначале в состояние мягко-пластичное, а при дальнейшем увлажнении в текучее, т. е. неустойчивое и вредное с дорожной точки зрения.

Мягко-пластичная консистенция характеризуется значительной и резкой потерей несущей способности грунта, все

больше и больше уменьшающейся с возрастанием влажности в грунте. При этой консистенции грунт проявляет присущее ему свойство липкости в максимальном выражении, что обычно и приводит к образованию больших деформаций при использовании грунта в качестве несущего слоя дороги. Дальнейшее увеличение влажности переводит грунт в текучее состояние, которое характеризуется полной потерей его несущей способности. Грунт при текучей консистенции прев-

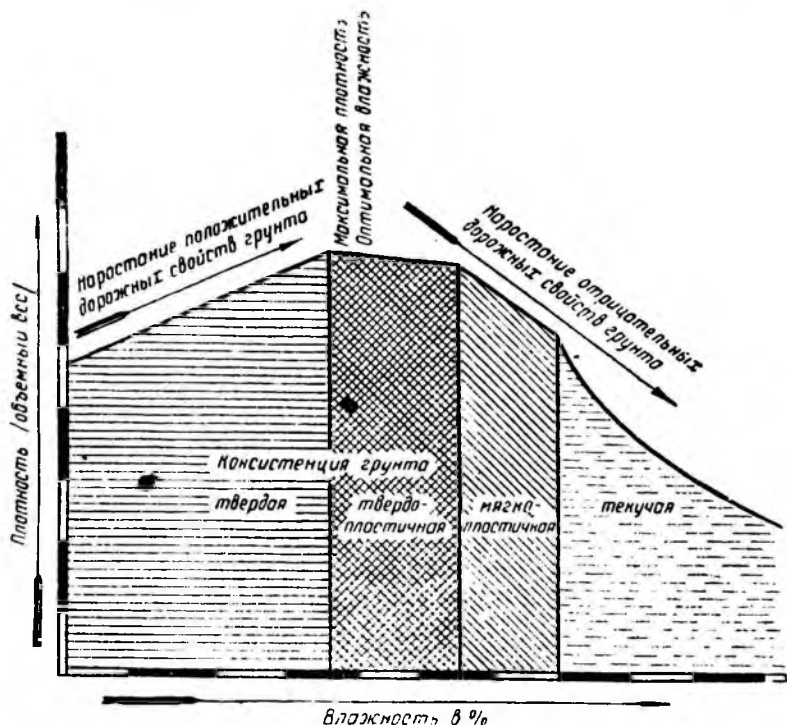


Рис. 2. Изменение свойств грунта в зависимости от влажности.

ращается в легко подвижную, неустойчивую массу, совершенно непригодную для нормальных условий эксплуатации дороги.

При мягко-пластичной и текучей консистенции грунт непригоден для производства работ по смешению с различными вяжущими материалами и добавками.

При большом увлажнении грунта влага находится в форме свободной воды и играет отрицательную роль, ибо, находясь в избытке, она переводит грунт в неустойчивое равновесие, характеризующееся малой несущей способно-

стью, большой липкостью, набуханием и малой связностью, т. е. свойствами, неблагоприятными в дорожном отношении. Чтобы поддержать грунт в хорошем устойчивом состоянии, т. е. в состоянии, позволяющем применять грунт для основания и для покрытия дороги, следует всегда стремиться удалить свободную воду, используя для этого все возможности как мелиоративного, так и строительного порядка.

Таким образом, при решении вопросов, связанных с укреплением грунтов, необходим дифференцированный подход в отношении оценки влияния влажности на устойчивость грунтов.

Умело используя полезные качества, заложенные в физическом взаимодействии грунта с водой, можно будет достигнуть высокого эффекта в повышении дорожных свойств грунта с малой затратой энергии на последующую его обработку.

4. Стабилизация грунтов

Логическим завершением изложенных выше теоретических представлений о грунтах как дисперсных коллоидных системах являются методы стабилизации грунтов, применение которых становится все шире и шире в современной дорожной технике.

Возникновение и быстрое внедрение в производство методов стабилизации может быть объяснено следующими причинами.

В настоящее время окончательно установлено, что дорожное покрытие даже самого высокого типа будет находиться в хорошем состоянии лишь в том случае, если грунт, на котором уложено это покрытие, будет доброкачественным и устойчивым. Без устранения отрицательных свойств грунта теперь немыслима постройка прочной и ровной дорожной одежды.

С углублением и расширением наших знаний о грунтах появилась возможность искусственного регулирования или же коренного изменения физико-механических свойств грунтов в сторону повышения устойчивости грунта в дороге.

Таким образом, на запросы дорожного строительства современное грунтоведение сумело быстро ответить научно обоснованными методами искусственного укрепления грунтов, получившими известность под именем стабилизации грунтов.

Что же следует понимать под этими методами?

Под стабилизацией грунтов необходимо понимать совокупность мероприятий, приводя-

щих грунты в такое состояние, при котором они обладают благоприятными дорожными свойствами, в условиях переменного увлажнения. При этом следует различать стабилизацию грунтов для основания и для верхних слоев дорожной одежды.

В настоящее время широкую апробацию в производстве получили следующие методы стабилизации грунтов:

1. Стабилизация устойчивости грунтов гранулометрическими добавками.

2. Обработка грунтов органическими вяжущими материалами: битумами и дегтями различной вязкости как горячим, так и холодным способом.

3. Обработка грунтов неорганическими вяжущими материалами: цементом, известью и др.

4. Стабилизация грунтов добавками гигроскопических солей: хлористого кальция, хлористого магния или хлористого натрия.

Каждый из указанных методов обработки грунта имеет свои особенности как по эффективности повышения устойчивости грунта в дороге, так и по условиям производства работ.

Достаточно полно разработан метод термической обработки грунтов. В зависимости от температуры, действующей на грунт, последний претерпевает различные физико-химические изменения и приобретает полезные в дорожном отношении физические и механические свойства.

При этом различают: 1) клинкерный обжиг—при температуре обжига свыше 1000° ; 2) обжиг—при нагреве грунта до $700\text{—}900^{\circ}$; 3) прогрев или термическая дегидратация грунта—при температуре нагрева $300\text{—}500^{\circ}$.

Указанные методы термической обработки грунтов теоретически освещены в достаточной степени и могут иметь весьма разнообразное применение в дорожном строительстве. Главным тормозом в деле широкого применения обжига и прогрева грунтов в дорожном строительстве является отсутствие простых механических устройств для термической обработки.

В последние годы проведен целый ряд исследований (Ендель, Толстопятов, Асколонов и др.) по разработке методов электрохимического закрепления грунтов. Сущность электрохимического закрепления заключается в том, что в грунт пропускается постоянный электрический ток, который активизирует внутренние свойства грунта, возбуждает и вызывает целый ряд физико-химических процессов и химических реакций в грунте.

Эти процессы вызывают глубокие изменения в глинисто-коллоидальной части грунта, в результате чего в нем образуются новые соединения, обладающие высокими вяжущими свойствами и водостойкостью.

Методы электрохимического закрепления грунтов находятся в стадии лабораторных исследований и опытов полупроизводственного масштаба.

Выше мы указывали, что руководящим положением при любых методах стабилизации грунта следует признать активное воздействие на глинисто-коллоидальную часть грунта. Общая направленность такого воздействия должна быть ориентирована на мобилизацию внутренних ресурсов, заложенных в том или ином грунте,—использование способности последнего к электрохимическим реакциям и взаимодействиям, использования сил молекулярного притяжения, сил капиллярного впитывания и пр.

Если учесть, что коллоидными свойствами (способностью к физико-химическому обмену и пр.) обладают не только обрабатываемые грунты, но и вяжущие материалы, как-то: битумы, дегти, цементы, известь и др., то возможность коренного изменения физико-механических свойств грунта путем активного воздействия вяжущими материалами на его активную глинисто-коллоидальную часть становится очевидной.

Чем больше будут использованы внутренние ресурсы и правильно учтены свойства грунта, тем меньше потребуются затраты на обработку, тем эффективней будет результат стабилизации грунта.

Отмечая важное значение всех процессов (физических, физико-химических и химических), происходящих при обработке грунта, необходимо подчеркнуть, что какие бы большие изменения в свойствах грунта ни произошли, этим не исчерпываются задачи стабилизации грунта.

Стабилизация грунта—это комплекс мероприятий технологического и строительного порядка, и выполнение отдельных приемов не может обеспечить тот суммарный эффект, который можно получить при обработке грунта, соблюдая весь цикл необходимых операций.

При введении в грунт тех или иных вяжущих материалов происходит ряд взаимодействий, результатом которых является изменение физико-механических свойств грунта. Однако максимального эффекта от такой обработки можно ожидать лишь при условии тщательного и равномерного распределения в нужном количестве вяжущего материала с последующим уплотнением всей массы обработанного грунта.

Таким образом, любой метод стабилизации грунта будет эффективным лишь при условии:

а) внесения вяжущего материала в количестве, достаточном для изменения свойств обрабатываемого грунта;

б) равномерного распределения вяжущего материала в массе обрабатываемого грунта, что обеспечивает более полное взаимодействие грунта с вяжущими;

в) тщательного уплотнения обработанной смеси до заданной плотности.

При проведении указанных операций, как-то: распределении вяжущих, смешении и уплотнении обработанной смеси, большую роль играет вода, находящаяся в обрабатываемом грунте.

Степень влажности грунта по-разному влияет на результаты обработки, в зависимости как от метода обработки, так и от характера производимых строительных операций.

Так, например, предварительное размельчение грунта, необходимое при введении любых вяжущих материалов, лучше всего производить при влажности грунта, несколько превышающей его максимальную гигроскопичность, и ниже границы раскатывания по Аттербергу. При этой степени влажности даже сильно связные грунты разрыхляются и размельчаются сравнительно легче, чем в сухом состоянии, характеризуются малой пылимостью и не прилипают к рабочим частям машин, производящих работы по разрыхлению и размельчению.

Для смешения вяжущих материалов с грунтом также желательно иметь влажность в тех же пределах, как и при его размельчении.

Большое различие во влиянии влажности грунта наблюдается при уплотнении обработанных смесей. Если грунт обрабатывается органическими вяжущими материалами, т. е. материалами, по своим свойствам обладающими той или иной вязкостью, то влажность обработанной смеси не играет решающей роли в конечном итоге стабилизации.

Наоборот, при обработке грунта цементом или известью, влажность смеси в период ее уплотнения играет решающую роль. Если степень влажности при этом не будет соответствовать «оптимальной» влажности, установленной для этой смеси, уплотнение не достигнет своего максимума, процессы гидратации цемента не произойдут, в результате чего требуемая устойчивость смеси не будет получена.

Избыточная влажность (превышающая оптимальную влажность) для всех методов стабилизации является крайне нежелательной, ибо при ней не обеспечивается получение тре-

буемой плотности, и операции по смещению и размельчению становятся трудно выполнимыми.

Из приведенных примеров следует, что указанные выше методы стабилизации грунта имеют свои специфические особенности и требуют при своем выполнении дифференцированного подхода. Только правильно учитывая те или иные особенности применяемого метода, не работая по шаблону, можно получить максимальный эффект от проведенной обработки грунта.

Г Л А В А II

ГРУНТОВЫЕ СМЕСИ ОПТИМАЛЬНОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА

Вопросу придания естественным грунтам определенных свойств, желательных для дорожных целей, путем их перемешивания между собой уделяется внимание в дорожной литературе уже много лет. Около 30 лет тому назад впервые в США было проведено обследование значительного количества грунтовых дорог, которое позволило установить, какие грунты наиболее подходящи с дорожной точки зрения. Тогда же впервые в дорожном деле было применено изучение гранулометрического состава грунтов и их физико-механических свойств. Более 20 лет этим вопросом занимаются у нас в СССР.

На основе совместной работы почвоведов и дорожных инженеров удалось установить не только, какие грунты наилучшим образом зарекомендовали себя в основании и дорожной одежде, но и подвести теоретическую и богатую экспериментальную базу под так называемые оптимальные или плотные смеси применительно к рыхлым горным породам различной крупности и находящимся в различной почвенно-гидрологической обстановке (влияние подстилающих грунтов, климат, условия водоотвода).

В настоящий момент можно считать установленными следующие основные положения:

1. Работа грунта в основании и в дорожной одежде обусловливается требованием обеспечить в наиболее неблагоприятных условиях увлажнения (избыток или, наоборот, недостаток влажности) некоторую определенную сопротивляемость грунта воздействию колес.

2. Эта сопротивляемость грунта, часто называемая несущей способностью, может быть различна для грунтов, уложенных в основании или предназначенных для работы в юкритии.

3. Сохранение естественным грунтом или надлежаще обработанной искусственной смесью грунтов определенной сопротивляемости или, как говорят, стабилизации грунтов может быть достигнуто двумя основными путями: а) повышением внутреннего трения и связности за счет смешения различных фракций грунтов; б) механическим уплотнением грунта, в результате которого грунт перестает в известных условиях реагировать на воздействие увлажнения. Иными словами, стабилизация грунта достигается не только повышением физико-механических свойств грунтовой смеси, но и обеспечением грунта от воздействия на него воды путем надлежащего уплотнения.

Обширный опыт у нас и в США показывает, что почти все грунты при уплотнении их до 90—95% наибольшего уплотнения (так называемое стандартное уплотнение при оптимальной влажности) практически не меняют свою влажность в продолжение года, если не подвергаются воздействиям непосредственно проходящего транспорта на узких шинах и процессов пучинообразования, могущих вызвать разуплотнение грунтов в зоне их промерзания.

Однако в дорожных конструкциях нас интересует не только один факт стабилизации тех или иных, в частности, физико-механических показателей грунта, но и некоторая предельная их величина, принимаемая при проектировании конструкций. Таким показателем, на основе наших работ¹—может быть принят модуль деформации грунта. Степенью стабилизации в дальнейшем будем называть отношение модулей деформации различных грунтов при их наибольшем возможном насыщении водой к модулю деформации такого материала, как уплотненный щебень, практически не меняющего своего модуля деформации при увлажнении.

В связи с этим не лишен интереса способ определения сопротивляемости грунтов, предложенный и широко распространенный в США². Грунт уплотняется до оптимальной плотности при оптимальной влажности в цилиндре диаметром и высотой 15 см; уплотнение производится трамбовкой в 4,5 кг, при высоте падения 45 см. Грунт уплотняется в 5 слоев по 55 ударов на каждый слой, после чего образец в цилиндре 4 суток подвергается насыщению водой снизу.

Испытание заключается в определении нагрузки, которая вдавит в верхнюю плоскость цилиндра штамп диаметром $D=4,9$ см (площадь 3") на глубину $\delta=0,25$ см и сравнении

¹ Н. Н. Иванов и А. М. Кривиский. Выбор конструкций дорожных одежд, 1943.

² Technical manual of Aviation Engineers. Dec. 31, 1942.

не с нагрузкой для вдавливания того же штампа в сухой уплотненный щебень (1365 кг).

Коэффициент несущей способности определяется из выражения $K = \frac{Q}{13,65}$ % кг, где Q — нагрузка в кг для вдавливания штампа указанного диаметра в данный грунт на глубину 0,25 см. Иными словами, определяется в нашем понимании модуль деформации и степень стабилизации насыщенного водой грунта. Соотношение между коэффициентом несущей способности и модулем деформации (E) определяется из выражения

$$E = \frac{Q \cdot D}{\frac{\pi D^2}{4} \times \delta} = \frac{4 \cdot Q}{\pi D \times \delta} = \frac{Q}{0,96} = 14,2 K$$

Сопоставление по этой формуле модулей деформации, полученных в результате многочисленных исследований ДОРНИИ в лабораторных и полевых условиях, с данными, приводимыми американскими авторами, показывают совпадение (табл. 4) более чем удовлетворительное, особенно учитывая,

Таблица 4

Значение модуля деформации в кг см²

Наименование грунтов	Вычисленные по данным США для капиллярно-насыщенных образцов	Средние данные ДОРНИИ для увлажненных районов
Глины высокой пластичности	42—71	100—110
Суглинки мало пластичные	75—142	75—125
Пылеватые суглинки средней пластичности	97—114	50—100
Песчано-глинистые смеси, плохо подобранные (из более мелкого материала)	142—284	200—300 ¹
То же, хорошо подобранные	281—710	300—450 ¹
Плохие гравийные смеси (избыток глины или песка)	142—568	650
Хорошие гравийные смеси	568—1136	900—1000
Пески чистые	213—568	250—450 ¹
Щебень	1136—1420	1000—1250

что определения делались по значительно разнящейся методике. В частности, наши исследования показали, что глинистые грунты в естественных условиях не достигают полного увлажнения, получаемого на небольших образцах.

Описанный метод применим не только для грунтов, искусственно уплотненных в лабораторных условиях, но и для

¹ В зависимости от крупности скелета.

любого естественного состояния грунта, взятого в ненарушенном сложении.

Рассматривая табл. 4, легко убедиться, что наилучшие показатели стабилизации имеют крупнозернистые смеси, надлежаще подобранные, а затем идут пески и хорошо подобранные, т. е. плотные песчано-глинистые смеси с надлежащим количеством и качеством глинистого вяжущего вещества. Все остальные грунты имеют показатели, значительно более низкие.

В отношении песков следует оговориться, что они могут сохранить свое плотное сложение, если только они находятся в основании и не подвержены непосредственному воздействию транспорта.

Легко показать, что изменение модуля грунта, скажем, в 2—2,5 раза требует увеличения толщины дорожной одежды или искусственного основания, то же примерно того же порядка, т. е. степень стабилизации грунта имеет важное технико-экономическое значение.

Ясно также, что неудовлетворительный подбор смеси может быть оправдан только неблагоприятным сочетанием местных материалов, так как он часто изменяет показатели стабилизации почти вдвое.

В свете приведенных соображений вопрос стабилизации грунта приобретает несколько иное толкование, чем это имело место при получении плотных или оптимальных смесей, так как имеется вполне определенный критерий для оценки и сопоставления грунтовых смесей.

Можно считать бесспорным следующее:

1. Для обеспечения наибольшего коэффициента трения смеси необходимо, чтобы скелет грунтовой смеси был возможно крупнее и одновременно плотнее. Смеси одинаковой плотности, но различной крупности, будут иметь разные показатели стабилизации.

В свою очередь, отличаться будут смеси, одинаковые по крупности частиц, но разные по плотности.

2. Для повышения механической прочности необходимо при наибольшем возможном коэффициенте трения повысить еще связность (сцепление), что достигается введением в него грунтового вяжущего, состоящего из частиц пыли и глины. Недостаточное количество этого вяжущего (Soil mortar, по американской терминологии) не обеспечивает связности смеси в сухую погоду, наоборот, избыток его или неподходящее качество ведут к уменьшению степени стабилизации при увлажнении смеси (наличие свободной воды).

Таким образом, практически стабилизации грунтов сводятся к трем основным задачам:

а) подобрать возможно более плотную смесь из наиболее крупных имеющихся в распоряжении материалов;

б) установить необходимое количество мелкозема (пыли и глины), достаточное для связывания скелетной части грунта с учетом климатических условий (возможное увлажнение);

в) произвести смешение нужных грунтов и уплотнить смесь до 90—96% наибольшего объемного веса.

Вопрос проектирования плотных смесей разработан и экспериментально и теоретически с достаточной четкостью; несколько неопределеннее обстоит вопрос в отношении наиболее мелких частиц, в частности, глинистых. Значительным шагом вперед, примерно лет 15 тому назад, был переход от двухчленной классификации грунтов (песок крупнее 0,01 мм, глина мельче 0,01 мм) к трехчленной (песок крупнее 0,05 мм, глина мельче 0,005 мм, пыль 0,05—0,005 мм). Этот шаг, почти одновременно сделанный у нас и в США, позволил решить и объяснить ряд свойств и явлений в грунтах и значительно обогатил учение о дорожностроительных свойствах грунтов.

Однако уже и тогда раздавались голоса (например, проф. М. И. Филатов), что этого недостаточно, что глину нельзя характеризовать только по видимым или кажущимся размерам частиц и что ее необходимо дополнительно характеризовать еще другими физическими свойствами. Иными словами, высказывалась мысль, что гранулометрическая классификация в отношении глинистых частиц не может считаться исчерпывающей, так как частицы мельче 0,005 мм могут обладать отличными свойствами в отношении связности и стабильности при увлажнении (см. гл. I).

В значительно меньшей степени этими же свойствами обладают и частицы пылеватые, особенно их более мелкая фракция (так называемая иловатая). Поэтому в настоящее время считается общепринятым подбирать плотную смесь, начиная с частиц крупнее 0,05 мм (или остающихся на американском сите № 200—0,071 мм), а более мелкие объединять в одну группу, одновременно характеризуя всю часть грунта, прошедшую через сито 0,5 мм (в США 0,42 мм) по свойствам пластичности (предел текучести и число пластичности по Аттербергу).

Это, с одной стороны, дает возможность комплексно охарактеризовать всю мелкозернистую часть грунта и, с другой, упрощает необходимые лабораторные манипуляции, так как дает возможность ограничиться ситовым анализом, не прибегая к сравнительно сложным способам гранулометрического анализа, основанным на учете скорости падения в воде частиц разной крупности и тем более определения по-

глощающего комплекса. Подбору скелетной части грунта уделялось в разных странах много внимания как в связи с грунтами, так и бетонными (асфальтовыми и цементными) смесями. Предложено значительное количество различных предельных кривых, в той или иной степени обоснованных теоретически и в большей своей части являющихся результатом чисто эмпирического обобщения материалов, взятых из опыта.

Особое место среди этих предельных составов принадлежит кривым, разработанным автором на основе большого количества экспериментов, проведенных в ДОРНИИ проф. В. В. Охотиным. Проф. В. В. Охотин готовил в лаборатории смеси различных фракций грунтов, полученных им путем рассева и отмучивания образцов грунтов, полученных из самых разнообразных районов СССР. Для удобства экспериментирования и последующих выводов все фракции были выбраны таким образом, чтобы размер наименьшего зерна вдвое отличался от наибольшего. Таким образом, все фракции были как бы подобраны друг другу и только отличались размерами зерен. Фракции смешивались между собой в различных пропорциях и после уплотнения каждый раз определялась пористость смеси.

На основе этих опытов удалось установить следующие основные положения:

1. Пористость смеси из нескольких фракций, как песчаных, так и гравелистых, при одинаковом отношении размеров зерен и при одних и тех же весовых отношениях каждой фракции—одинакова. Другими словами, пористость смеси не изменяется от одновременного уменьшения или увеличения в одинаковое число раз размеров всех зерен смеси.

2. Наименьшая пористость смеси фракции получается, если размеры зерен, заполняющих пустоты более крупных фракций, будут последовательно уменьшаться в 16 раз. При этом весовое количество каждой последующей фракции должно составлять 43% от предыдущей. Смеси с последовательными количествами 25% и 50% дают почти такую же пористость,—это дает возможность установить пределы для плотных смесей. Таким образом, если основная фракция взята 32—16 мм, то следующими должны быть 2—1 мм, 0,12—0,06 мм, 0,008—0,004 мм. Применение фракций с частицами более мелкими при сухом уплотнении не даст эффекта, и потому при экспериментах 0,004 мм было принято за предел скелета.

3. При составлении смесей из фракций с размером зерен в 8, 4 и 2 раза меньше пористость смесей получается большая, а весовое количество заполняющей фракции возрастает. Так, при заполнении пустот фракцией с размером зерен, в

1 раз меньшим, оно должно составлять 0,55 от основной фракции, а при заполнении пустот фракцией с размером зерен в 4 раза меньшим,—0,66.

4. Если к смеси фракций, составленных по указанному в п. 2 или 3 признаку, прибавить какую-либо промежуточную фракцию, то пористость увеличится. Но если к ней прибавить ряд из того же количества фракций и имеющих одинаковую с первой смесью последовательность в размере зерен, то пористость не изменится.

5. Легко заметить, что количество заполняющей фракции с размером частиц, в 16 раз меньшим и 4 раза меньшим, относится, как $\sqrt[4]{0,43} = 0,66$.

Соотношение соседних фракций должно быть $\sqrt[4]{0,66} = 0,81$. Это дает возможность построить непрерывный ряд фракций с постепенно уменьшающимися размерами зерен, с таким весовым отношением друг к другу, чтобы количество фракций с зернами, в 16 раз меньшими, находилось в отношении 0,25—0,43—0,50, что соответствует весовому соотношению соседних фракций с размером зерен, отличающимся вдвое.

$$K = \sqrt[4]{0,25} - \sqrt[4]{0,43} - \sqrt[4]{0,50} = 0,70 - 0,81 - 0,84,$$

названному коэффициентом сбега.

Дальнейшие опыты автора уже с дроблеными смесями для асфальтобетона показали, что указанные пределы, дающие колебания в пористости до 1,5%, могут быть расширены до 0,65—0,90, при которых колебания в пористости доходят всего до 2%.

Предельные кривые, построенные автором по этому принципу, исходили из подтвержденного экспериментом положения, что любая кривая в этих пределах, имеющая постоянный коэффициент сбега, будет давать достаточно плотную смесь.

Однако надо было еще проверить, можно ли считать, что всякая кривая гранулометрического состава, укладываемая в указанные пределы, будет обладать достаточной плотностью. Многочисленные исследования в этом направлении, сделанные как автором, так и целым рядом других исследователей, показали, что все кривые в указанных пределах дают вполне удовлетворительные результаты для грунтовых, гравийных и асфальтовых смесей.

В табл. 5. приводятся предельные гранулометрические составы плотных смесей в двух предположениях:

**Пределы гранулометрического состава плотных смесей прсф. Н. Н. Иванова
с коэффициентами сбега 0,65 и 0,90**

Наибольший размер частиц каменного материала мм	% частиц, проходящих через сита ^а								
	50	40	20	10	5	2	1	0,5	0,074
Пятьдесят	90—100	95—88	82—58	70—33	60—25	47—13	38—9	31—6	14—2
Сорок	—	90—100	87—66	75—43	64—28	51—16	43—10	34—7	19—2
Тридцать пять	—	—	89—70	76—46	65—30	53—17	44—11	35—7	19—2
Тридцать	—	—	91—77	78—51	66—33	53—19	44—13	35—8	17—3
Двадцать пять	—	—	95—87	81—57	69—38	55—22	45—14	36—9	17—3
Двадцать	—	—	90—100	85—65	73—43	57—24	47—16	38—10	18—4
Пятнадцать	—	—	—	90—76	77—61	62—29	52—19	43—12	22—4
Десять	—	—	—	90—100	85—65	69—37	58—24	48—16	25—5
Пять	—	—	—	—	90—100	80—57	66—37	54—24	27—7
Два	—	—	—	—	—	90—100	83—64	68—41	33—11

а) наибольшим размером частиц считается размер частицы, которых имеется меньше 10%.

б) в составы не введены глинистые частицы (мельче 0,005 мм).

Это особенно отражается на нижних пределах фракций мельче 0,5 мм, так как количество глинистых частиц для наиболее мелкопористых грунтов может достигать до 12—15%. Количество глины, с одной стороны, необходимо для связывания крупных частиц, с другой стороны, не должно быть избыточным во избежание размокания смеси при увлажнении. Оно зависит в значительной мере от свойств (см. гл. 1) глинистого цемента. В первой стадии дорожных исследований были установлены определенные пределы глинистых частиц, наиболее отвечающие оптимальным смесям в разных климатических условиях (от 3 до 14% для песчано-глинистых смесей и от 2 до 5% для гравийных), иногда еще указывалось, что 1% гумуса соответствует 1,5 или 2% глины.

Однако, как указывалось выше, свойства так называемых глинистых частиц не могут считаться одинаковыми, и, кроме того, количество их должно быть увязано с общим количеством частиц мельче 0,05 мм.

Поэтому в пределы табл. 5 должны быть внесены коррективы, исходя из целесообразности объединить все фракции мельче 0,074 мм и, кроме того, разделить все смеси на две крупные группы:

а) смеси, укладываемые в нижних слоях дорожной одежды, где преобладает значение устойчивости при увлажнении над необходимой связностью грунта, имея в виду отсутствие непосредственного воздействия транспорта;

б) смеси, укладываемые в покрытия дорожных одежд, где надо опасаться не только размокания смеси, но и ее возможного расстройств в сухую погоду за счет недостатка связности. Отсюда смеси для верхних слоев, особенно в условиях взлетно-посадочных полос аэродромов, должны иметь больше глинистого вяжущего материала.

Суммируя опыт многочисленных исследований в СССР и на основе обширных литературных данных в иностранных, главным образом американских журналах (см. табл. 6 и 7), можно предложить следующую таблицу (табл. 8) оптимальных смесей, начиная с наиболее крупных, памятуя, что показатели стабильности смеси тем выше, чем они имеют более крупный скелет. Смеси наиболее мелкозернистые допустимы в искусственных основаниях только при полном отсутствии более крупного материала (модули деформаций очень мелкозернистых смесей при неблагоприятных условиях увлажнения могут быть выше, чем у аналогичных им по крупности песков).

Составы песчаных и гравийных глиносвязных смесей для дорожных покрытий по данным США

№ смесей	% частиц, проходящих через сита										Свойства фракций, проходящ. через сито № 40 (0,42 мм)		
	3"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	№ 44	№ 10	№ 20	№ 40	№ 200	предел текуч.	число пластичн.
	76 мм	50,8 мм	38,1 мм	25,5 мм	19,1 мм	9,54 мм	4,76 мм	2 мм	0,84 мм	0,42 мм	0,074 мм		

Н и ж н и й с л о й

1	100	65—100	—	45—75	—	30—60	25—50	20—40	—	10—25	3—10	не более 25	0—6
2	—	100	70—100	55—85	50—80	45—70	30—60	20—50	—	10—30	5—15	не более 25	не более 6
3	—	—	—	100	70—100	50—80	35—65	25—50	—	15—30	5—15	не более 25	не более 6
4	—	—	—	—	70—100	50—80	35—65	25—50	—	15—30	5—15	—	—
5	—	—	—	—	90—100	70—100	50—90	35—80	—	20—50	8—25	—	—
6	—	—	—	—	—	—	70—100	35—80	—	25—50	8—25	не более 25	не более 6
7	—	—	—	—	—	—	—	100	55—90	35—70	8—25	не более 25	не более 6

В е р х н и й с л о й

1	—	—	—	100	85—100	65—100	55—85	40—70	—	25—45	10—25	не более 35	4—9
2	—	—	—	—	100	—	70—100	45—80	—	25—50	8—25	не более 35	4—9
3	—	—	—	—	—	—	—	100	55—90	35—70	8—25	не более 35	4—9

¹ Фракций, проходящих через сито № 200 (0,074 мм), должно быть не более 0,65 фракций, проходящих через сито № 40 (0,42 мм).

Если материал, проходящий через сито № 40, не превосходит 20%, предел текучести допускается до 35, число пластичности до 9.

При числе пластичности <1—предел текучести до 40.

Стабилизированные грунты для оснований по данным США *

Сита (размер отв. в мм)	Процент частиц, проходящих через сито		
	А	В	С
50	100	—	—
18	70—100	100	100
5	55—85	70—100	—
2	40—70	40—80	80—100
0,42 ¹	25—45 ¹	25—50 ¹	35—70
0,074 ²	5—25 ²	8—25 ²	10—30

Для верхних слоев, непосредственно подверженных воздействию автотранспорта, применение мелкозернистых смесей (модуль деформации ниже 500) целесообразно только при благоприятных грунтах земляного полотна (легкие климатические и грунтовые условия) и при небольшом движении. При нормальном и тяжелом движении, при наличии малоустойчивых грунтов стабилизация их мелкозернистыми добавками, не обеспечивающими модуль деформации смеси порядка 600 кг/см² и выше, рекомендоваться не может, как не гарантирующая достаточную устойчивость во влажное время.

Получение оптимальных смесей практически может быть достигнуто двумя способами:

1) смешением грунта земляного полотна с потребным количеством добавок на всю толщину улучшаемого слоя с применением плугов, борон, грейдеров, катков;

2) постепенной присыпкой улучшающей добавки с тем, чтобы в несколько приемов получить оптимальную смесь, используя для перемешивания и уплотнения транспорт, движущийся по дороге, и утюги для выравнивания.

* "Technical Manual of Aviation Engineers", 1943 г.

¹ Часть, прошедшая через сито № 40 (0,42 мм), должна иметь число пластичности не более 6 (для верхнего слоя не менее 3).

² Количество частиц, прошедших через сито № 200 (0,074 мм), должно быть менее половины частиц, прошедших через сито № 40.

Для верхнего слоя только смеси В и С.

Составы оптимальных песчаных и гравийных глиносвязных смесей

№ смеси	Ориентир. модуль деформа- ция кг/см ²	% частиц, проходящих через сита, мм									Свойства смеси, прошедшей сито 0,5 мм	
		50 (60)	25	20	10	5	2	1	0,5 ¹	частиц мельче 0,074 мм ² (сито № 200)		
											предел текуч.	число пластич.

Верхний слой

1	1000	100	75—90	—	45—75	40—65	20—55	—	15—35	7—20	—	—
2	900	—	90—100	—	65—85	50—70	35—55	—	20—40	8—25	не более 35	4—8
3	850	—	—	90—100	70—90	55—75	35—65	—	25—45	8—25	—	—
4	700	—	—	—	90—100	70—85	45—75	—	25—55	8—25	—	—
5	600	—	—	—	—	90—100	60—80	—	35—55	10—30	—	—
6	300—400	—	—	—	—	—	80—100	80—60	40—70	15—35	—	—

Нижний слой

7	1000	90—100	55—85	—	35—70	25—60	15—50	—	10—30	5—15	не более 25	не более 6
8	900	—	90—100	—	60—80	40—70	25—55	—	12—35	5—17	—	—
9	850	—	—	90—100	65—85	45—75	27—60	—	15—40	6—20	—	—
10	700	—	—	—	90—100	65—85	40—70	—	18—50	7—25	—	—
11	600	—	—	—	—	90—100	55—80	—	25—55	10—27	—	—
12	300—400	—	—	—	—	—	80—100	—	25—70	10—30	—	—

¹ Мельче 0,25 не более 50%; критерием смеси служит число пластичности.

² При применении мягких и очень мягких гравийных материалов гранулометрический состав должен контролироваться только по проходу через наибольшее сито, через сито 2 мм и по содержанию пыли и глины.

В избыточно увлажненных районах следует придерживаться ближе к нижним пределам частиц мельче 0,074 мм, в сухих—к верхним.

ОБРАБОТКА ГРУНТОВ ОРГАНИЧЕСКИМИ ВЯЖУЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Наиболее эффективным методом стабилизации грунтов в настоящее время следует считать обработку их органическими вяжущими материалами (битумами, жидкими битумами, дегтями и эмульсиями). Метод этот, как показала практика, достаточно экономичен, поэтому он нашел широкое применение в дорожном строительстве. В ближайшем будущем вряд ли будут найдены другие, столь простые, и вместе с тем технико-экономически выгодные методы стабилизации грунтов.

При обработке грунтов органическими вяжущими материалами можно получить грунтовое покрытие, по своим качествам сходное с усовершенствованными покрытиями, — ровное, водонепроницаемое, упругое и обладающее высокой несущей способностью. Основным материалом для такого покрытия служит грунт (90—95%), использование которого в качестве дорожностроительного материала позволяет до минимума свести транспортные расходы.

Основание, сделанное из стабилизированного грунта, позволяет использовать более легкие конструкции покрытия. Такая одежда может выдержать самое интенсивное движение. В зависимости от назначения дороги и свойств грунта, методы обработки последнего могут быть различными.

Основным методом обработки грунтов органическими вяжущими материалами, для стабилизации их свойств, следует считать метод смешения. Смешение грунта с вяжущими может быть произведено непосредственно на дороге при помощи простейших дорожных машин — бороны, грейдера или специально сконструированных для этих целей машин — менсенера, родбильдера и т. п. Кроме того, смешение грунта с вяжущим может быть произведено на стационарных или полустационарных базах в смесителях, аналогично тому, как это производится при приготовлении асфальтового бетона. В некоторых случаях будет вполне целесообразным не производить обработку самого грунта, а изолировать поверхность грунтовой дороги от воздействия влаги сверху. Такая изоляция может быть достигнута в результате поверхностной обработки. В сухое время года в качестве временного мероприятия вместо поверхностной обработки можно производить только обеспыливание.

1. Физико-химические процессы при обработке грунтов органическими вяжущими материалами

Вопросам теории стабилизации грунтов в нашей стране посвящено большое количество работ. Основными из них следует считать работы проф. М. М. Филатова¹, проф. В. В. Охотина², Б. В. Толстомятова³, В. М. Безрука⁴, А. С. Мачулина⁵, авторов этой работы и др. За границей в работах различных исследователей наряду с вопросами практики стабилизации грунта вяжущими также уделяется внимание и вопросам теории.

Наибольшей известностью у нас в Союзе пользуется теория проф. Филатова, разработанная им на основе работ Толстомятова. По этой теории «битумные вещества способны образовать особые комплексные поглотительные (адсорбционные) соединения с высокодисперсной частью грунта типа «битума — глина». Один из этих веществ, главным образом ас-

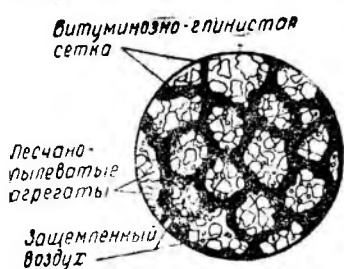


Рис. 3. Схема микроскопического строения чернозема

фальтенового типа, сообщают грунту «гидрофобные свойства»; другие, например смолы, связывают частицы грунта между собой благодаря развивающимся силам натяжения в битуминозно-глинистых пленках, и третьи, к которым относится так называемый свободный углерод, повышают температурную устойчивость и связующую способность вяжущего.

«Действительно, обращаясь к изображенной на рис. 3 схеме микроскопического строения битумированного⁶ чернозема, мы видим, что вяжущие вещества, в данном случае каменноугольная смола, с вязкостью по Хэтчинсону 45 сек., при 25°C и введенная в количестве 9% по весу, распреде-

¹ Проф. М. М. Филатов. Основы дорожного грунтоведения. Гос. транссиздат, Москва, 1936.

² Проф. В. В. Охотин. Грунтоведение. Изд. Военно-транспортной Академии Красной Армии, Ленинград, 1940.

³ Б. В. Толстомятов. Лабораторные опыты битумирования некоторых видов чернозема в дорожных целях. Труды ГДОРНИИ РСФСР, вып. III, 1932.

⁴ В. М. Безрук, П. В. Мельников, В. И. Тарасова. Лабораторные опыты улучшения дорожных свойств грунтов, обработанных битуминозными материалами. Труды ГДОРНИИ РСФСР, вып. VI, 1934.

⁵ А. С. Мачулин. Влияние гранулометрического состава на физико-механические свойства битумированных грунтов. Труды САДИ, 1940.

⁶ Термин «битумирование» ранее применялся вместо терминов «стабилизация органическими вяжущими материалами» — прим. автора

ляется в массе грунта, главным образом облекая частицы глинистой фракции, в то время как песчано-пылеватая часть собирается в битумированной массе в гнезда и линзы различной формы и величины».

«Очевидно, что здесь имеет место случай образования поглотительного соединения «битум—глина», которое стягивает гранулометрические элементы грунта и агрегаты, состоящие из песчаных и пылеватых частиц. В порах и пустотах между частицами остается защемленный воздух, а «битуминозно-глинистое вещество» обнаруживает присутствие в себе натяжения, как у резиновых пленок».

Далее проф. Филатов делает вывод «...дорожные одежды из укрепленного битумированием грунта необходимо рассматривать по своему строению не как однородно-монокристаллические, т. е. в виде массы, в которой лишь тончайшие поры остаются без вяжущего вещества, а главным образом как агрегатно-пористые субстраты, связанные эластическими пленками, образующими в массе грунта ряд губчатой сетки».

Мы подробно остановились на теории битумирования грунтов, предложенной проф. Филатовым, во-первых, потому, что эта теория цитируется не только в работах, посвященных этому вопросу, но и в учебниках для дорожных вузов, а во-вторых, потому, что считаем необходимым внести некоторые коррективы в этом вопросе. Конечно, бесспорным является тот факт, что грунты в своем естественном состоянии гидрофильны, и задача стабилизации сводится к приданию им гидрофобных свойств. Органические вяжущие материалы относятся к дисперсным материалам с ярко выраженными гидрофобными свойствами. Поэтому, производя обработку грунта такими материалами, мы в какой-то мере изменяем свойства грунта, а следовательно, и его гидрофильность.

Что же касается образования поглотительных соединений типа битум—глина, то если это явление и имеет место при обработке тяжелых грунтов, то при обработке песчаных и пылеватых грунтов образование таких соединений не может быть уже потому, что в составе указанных грунтов глинистые коллоидные частицы почти отсутствуют.

К образованию поглотительных соединений можно подойти несколько с другой стороны, тогда и картина микроскопического строения битумированного чернозема может быть объяснена под другим углом зрения. Прежде всего необходимо отметить высокую способность глин адсорбировать органические соединения—на этом основано применение некоторых глин (например, глина кил) и других грунтов (флорн-

дин) в качестве адсорберов при очистке нефтепродуктов. При этом наиболее активно наряду с асфальтенами адсорбируются и смолы, что легко можно заметить почти по полному отсутствию какого-либо цвета очищенного дистиллата, который при хорошей очистке получается совершенно бесцветным.

При обработке грунтов вяжущими для того, чтобы получить лучшее об'единение между грунтовыми частицами и вяжущими, необходимо предварительное хорошее размельчение грунта. Естественно, что даже в лабораторных условиях нельзя достигнуть размельчения глинистых грунтов до полного раз'единения отдельных частиц. Поэтому при об'единении грунта с вяжущими происходит обволакивание не отдельных частиц, а агрегатов различной формы и величины.

При смешении грунта с битумом или другим вяжущим материалом в первую очередь обволакиваются наиболее дисперсные частицы грунта, и если количество битума недостаточно для обволакивания всех частиц или если недостаточно тщательно произведено смешение грунта с вяжущим, то крупные частицы остаются необработанными. Вот такую картину и описал в микроскопической схеме Толстопяттов.

Степень гидрофобизации грунта зависит от целого ряда причин, и в первую очередь от свойств вяжущего материала и самого грунта.

Явления, происходящие на границе раздела грунт-битум, представляют сложный физико-химический комплекс, изучение которого представляет большие трудности уже потому, что сами грунты являются сложными дисперсными системами, природа которых еще далеко не изучена.

Вяжущие материалы (битумы, дегти) состоят из сложного комплекса различных органических соединений, природа которых изучена тоже весьма мало.

Согласно работам Нелленштейна¹ битум, а также и дегти представляют собой сложную коллоидальную систему из компонентов, которые сами по себе являются коллоидами и принадлежат к защитным лиофильным золям.

Маркуссон², основываясь на принципе избирательной растворимости битумов, предложил разделять их на: масла, смолы, асфальтены, карбены, карбоиды, асфальтогеновые кислоты и их ангидриды.

¹ „Asphalt und Teer“, №№ 10, 11, 14, 15, 1935. Статьи Е. У. Нелленштейн.
² И. Маркуссон. Асфальт. Нефтяное издательство, 1926.

По Маркуссону, дегти и пеки состоят из: дегтевых масел, дегтевых смол, оснований и фенолов, а также из свободного углерода. Таким образом, можно провести некоторую параллель между группировкой составных частей битумов и дегтей.

Исходя из теории Нелленштейна, свободный углерод, карбены и карбоиды, а также и в какой-то мере асфальтены можно рассматривать как ультрамикроны, смолы и кислоты, как защитные вещества, образующие вместе с вышеназванными ультрамикронами мицеллу, растворенную в маслах, являющихся их дисперсной средой.

Роль отдельных компонентов битумов и дегтей при обработке минеральных материалов различна. Карбены, карбоиды и свободный углерод сами не обладают вяжущими свойствами, а являются как бы наполнителями в системе вяжущего вещества. Асфальтены обладают вяжущими свойствами только при высоких температурах, а при нормальных температурах они хрупки. Смолы обладают высокой вяжущей способностью. Масла играют роль разжижителей. И только при определенном соотношении отдельных компонентов битума и дегти обладают хорошим сцеплением с минеральными материалами, т. е. нужными дорожными свойствами.

При исследовании физико-химических свойств битумов и отдельных компонентов выяснилось, что различные битумы и их компоненты характеризуются неодинаковыми поверхностными свойствами¹.

Асфальтогеновые кислоты и их ангидриды являются наиболее поверхностно-активной частью битумов. Асфальтены и смолы обладают высокой поверхностной активностью. Масла не обладают поверхностно-активными свойствами.

Грунты, со своей стороны, как это уже отмечалось выше, являются сложными дисперсными системами. Очевидно, что при объединении этих двух сложных систем (битума и грунта) на границе двух фаз должны происходить физико-химические процессы, а также, возможно, и химические процессы обменного порядка. Принято было считать минеральные материалы, а стало быть, и грунты инертными, а потому в практике дорожного строительства вкоренился термин «инертный материал». Поставленные нами работы по выяснению влияния минеральной среды на изменение свойств битумов²

¹ А. И. Лысихина, Л. Н. Ястребова. Физико-химические свойства битумов. Рукопись. ДОРНИИ, 1949.

² А. И. Лысихина, Л. Н. Ястребова, Н. Г. Дукарская. Изменение состава и физико-химических свойств битумов при обработке минеральными материалами. Рукопись. ДОРНИИ, 1940.

показали, что в зависимости от химического состава, величины и состава поглощающего комплекса грунта происходят различные процессы на границе раздела фаз грунт-битум. Химический состав грунта оказывает влияние на изменение состава битума, способствуя процессам полимеризации и окисления, а вследствие этого образованию высокомолекулярных соединений его. Наиболее интенсивное изменение состава битума наблюдается при содержании в грунте полуторных окислов и главным образом окиси алюминия.

Содержание воднорастворимых солей в значительных количествах усиливает процессы полимеризации и окисления. Кроме того, они могут оказывать влияние на прочность сцепления битума с грунтом. При увлажнении грунтов, содержащих щелочные соли, происходит химическая реакция между органическими кислотами битума и основанием соли, в результате чего образуются мыла, которые эмульгируют битум.

Величина поглощающего комплекса обуславливает интенсивность физико-химических процессов—адсорбции битума на поверхности частиц грунта. Грунты, имеющие высокую емкость поглощения, обладают высокими адсорбционными свойствами и в то же время почти не изменяют состава битума.

В наших исследованиях при извлечении битума из обработанного грунта в итоге выделялось битума больше, чем его вводилось. При повторении опыта, результаты получались одного и того же порядка, следовательно, можно было исключить «неточность лабораторного определения» и искать причину в другом объяснении. Это было тем более странным, что грунт, взятый для опыта (чернозем), обладал высоко развитой поверхностью, и можно было ожидать, что адсорбционная способность грунта будет настолько большой, что после его обработки полного извлечения битума нельзя будет получить. Учитывая, что в состав поглощающего комплекса входят органические соединения, гумус, мы предположили, что взятые нами растворители для экстрагирования битума из грунта одновременно с битумом извлекали и какую-то часть гумуса или, вернее, его смолистую часть, а потому сочли необходимым определить, выделится ли что-либо из чернозема в естественном состоянии, а также и других грунтов при промывке их выбранными растворителями: петролейным эфиром, спирто-эфиром и спирто-хлороформом. Для некоторых из этих грунтов, например, железистого песка, количество выделяемого битума составляло значительно больше 100%. Результаты этих исследований приведены в табл. 9.

Таблица 9

Наименование	Растворимая часть грунтов при вымывании			Всего вымывается в %
	петрол-эфиром	спирто-эфиром	спирто-хлороформом	
Чернозем моршанский . . .	—	0,03	0,04	0,07
Чернозем краснодарский . .	0,011	0,044	0,024	0,079
Суглинок подмосковный . . .	—	—	0,01	0,01
Лёссовидный суглинок краснодарский	—	0,018	0,007	0,025
Лёсс	—	—	0,012	0,012

Не определяя, что собою представляют выделенные вещества, была определена начальная поверхностная активность растворов их в бензоле на границе раздела с водой, при концентрации 0,001%. Полученные результаты приведены в табл. 10.

Таблица 10

Растворимая часть грунтов при вымывании	Наименование грунтов				
	чернозем моршанский	чернозем краснодарский	суглинок подмосковный	лессовидный суглинок краснодарский	л ё с с
Спирто-эфиром	—	1747,0	—	—	—
Спирто-хлороформом	4900,0	1100,0	692,0	2500,0	6000,0

Величины начальной поверхностной активности выражены в эрг/см² : г/л.

Полученные данные указывают, что в системе грунт+битум наряду с поверхностно-активными веществами битума имеются весьма активные вещества в составе самого грунта. Очевидно, что при таком положении вещей возможность взаимной адсорбции, а отсюда и обменных реакций вполне вероятна. В зависимости от количества и состава поверхностно активных веществ в системе грунт+битум будет находиться прочность пленок битума на поверхности грунтовых частиц.

В тех случаях, когда при экстрагировании битума из обработанного грунта количество битума получается меньше 100%, имеет место необратимая адсорбция, возможно, в результате образования более высокомолекулярных соединений битума—карбенов и карбоидов, которые не могут быть выделены растворителями, применяемыми нами для экстра-

гирования битума. Если это так, то вещества, содержащиеся в грунтах, которые способствуют образованию этих высокомолекулярных соединений, являются катализаторами.

Отмечая выше большое значение содержащихся как в грунтах, так и битумах поверхностно активных веществ, которые обуславливают прочность связи между частицей грунта и пленкой битума, нельзя обойти вопрос о влиянии воды при стабилизации грунтов битумом, так как и в лабораторных условиях для стабилизации органическими вяжущими материалами используются грунты в воздушно-сухом состоянии, т. е. содержащие гигроскопическую воду, на практике же приходится обрабатывать грунты с различной степенью увлажнения.

Вопросу о роли воды при обработке грунтов битумами уделяется внимание в работах проф. Филатова, Мельникова и др., которыми отмечается положительное влияние воды на результаты обработки грунтов битумом. Указанные исследователи считают, что вода, являясь смазкой между частицами грунта, способствует лучшему уплотнению образца. Лучшее уплотнение в присутствии воды объясняется тем, что вода приводит в набухшее состояние почвенные коллоиды. Кроме этих лабораторных исследований, практика показала, что лучшие результаты при обработке методом смешения на дороге получаются в том случае, когда грунт находится при влажности, близкой к величине его молекулярной влагоемкости (по Лебедеву).

Учитывая изложенное, остановимся несколько на теории этого вопроса. Как сказано в гл. I, различают в грунте следующие виды воды: 1) химически связанную, 2) физически связанную и 3) свободную. Вода химически связанная входит в состав молекулы грунтовых минералов и не отражается на поверхностных явлениях, происходящих на границе раздела фаз битум—грунт. Вода, физически связанная, удерживается молекулярными силами частицы грунта, образуя на последней пленку; таким образом, при обработке грунта битумом эта вода непосредственно соприкасается с образующейся на поверхности грунтовых частиц пленкой битума, и поэтому, очевидно, участвует в процессах, происходящих на поверхности этих материалов.

Под свободной водой, содержащейся в грунте, понимается вода, которая не удерживается молекулярными силами грунта, а передвигается в нем под влиянием силы тяжести.

В силу того, что физически связанная вода подвержена действию молекулярных сил и состоит из ориентированных молекул, она обладает рядом специфических свойств, отлич-

чающихся от свойств свободной воды. Вследствие большого давления, которое получается в пленке адсорбированной воды (так, например, Гаркина и Евинг для воды, адсорбированной на угле, вычисляют давление в 37.000 ат), свойства ее приобретают свойства полутвердого тела, хотя и могут при этом весьма значительно деформироваться.

Количество воды, способное удерживаться молекулярными силами грунта, зависит от величины высокодисперсной части грунта, его поглощающего комплекса и характера поглощенных катионов. О различной способности поглощенных катионов к гидратации можно судить из нижеследующих данных о толщине водных пленок вокруг частиц:

Na	60—70	мол. воды
K	12—17	" "
Mg	20	" "
Ca	14	" "
H	1	" "

Таким образом, грунт, имеющий в своем составе поглощенный натрий, будет иметь на поверхности своих частиц наиболее толстую водную пленку.

Наличие физически связанной воды в грунтах обуславливает, кроме способности адсорбированных катионов гидратироваться, также присутствие полярных гидрофильных групп в грунте. Грунты, содержащие органическое вещество, характеризующееся в большей степени, чем минеральная часть, гидрофильными свойствами будут в большей степени адсорбировать на своей поверхности воду.

Различные грунты, обладая неодинаковой способностью адсорбировать на своей поверхности воду, будут проявлять эту способность в зависимости от степени своего увлажнения. Грунты, находящиеся в воздушно-сухом состоянии, имеют на своей поверхности один слой адсорбированной воды — гигроскопическую воду.

При увлажнении грунта на частицах его образуется пленка воды, состоящая из нескольких слоев ее. Максимальное количество водных пленок, которое частица грунта способна удерживать на своей поверхности молекулярными силами А. Ф. Лебедев¹ называет максимальной молекулярной влагоемкостью грунта. Однако надо отметить, что величина максимальной молекулярной влагоемкости, по Лебедеву, как величина адсорбированной воды, встречает возражение со

¹ А. Ф. Лебедев Почвенные и грунтовые воды. Сельхозгиз, 1935.

стороны других исследователей (Думанский, Чапек)¹, которые считают, что величина максимальной молекулярной влагоемкости, по Лебедеву, включает в себя частично и свободную воду².

На основании этих теоретических предпосылок лучших результатов следует ожидать при обработке битумом сухого грунта, при величине же свыше максимальной молекулярной влагоемкости прочность сцепления битума с грунтом будет уменьшаться. Однако в силу достаточной способности битумов к водопроницаемости и воздухопроницаемости получить пленку битума на частице грунта, не окруженной пленкой воды, не представляется возможным. Грунт, высушенный до удаления гигроскопической воды и обработанный битумом, находился в течение нескольких дней на воздухе, после чего в обработанном грунте вновь была определена гигроскопическая вода, величина которой оказалась равной гигроскопической воде необработанного грунта.

Исходя из этого, следует, что при обработке битумом сухого грунта, со временем произойдет насыщение этого грунта водой, количество которой будет зависеть от его свойств.

Положительную роль воды следует отнести за счет того, что при влажности грунта, близкой к величине его максимальной молекулярной влагоемкости, грунт находится в наиболее удобообрабатываемом состоянии, так как результаты, полученные при обработке грунтов битумом, в большой степени зависят от состояния поверхности обрабатываемого материала.

В том случае, когда грунт находится в агрегированном состоянии, пленка битума будет обволакивать отдельные агрегаты грунта, внутри которых находятся коллоидные частицы, от наличия которых и зависит устойчивость водных свойств грунта. Естественно, что при таких условиях обработки гидрофобизация этих частиц не может быть осуществлена полностью, и при увлажнении они будут проявлять свои отрицательные свойства. Вследствие того, что при влажности, близкой к величине максимальной молекулярной влагоемкости, грунт находится в состоянии наилучшей удобообрабатываемости, гидрофобизация его, ввиду возможности более равномерного распределения битума между частицами, протекает в наиболее благоприятных условиях, а следовательно, и свойства обработанного грунта будут наилучшие.

¹ А. В. Думанский и М. В. Чапек. Вода в почве и доступность ее растениям. „Известия Гос. научно-исследовательского института коллоидной химии“. 1934, вып. 2.

² Количество воды, адсорбированной частицами грунта, будет зависеть также от давления на грунт, независимо от того, будет ли оно внешним или за счет внутренних сил, например, капиллярным — прим. ред.

Благоприятными являются условия приготовления грунт-асфальта, так как при предварительной просушке грунта при надлежащей температуре может произойти свертывание коллоидной части грунта и тем самым потеря его способности к гидратации.

2. Специфика свойств грунтов при стабилизации их органическими вяжущими материалами

Исходя из теоретических предпосылок, всякий грунт может быть стабилизирован органическими вяжущими материалами.

Глинистые и тяжелосуглинистые грунты в лабораторных условиях можно обработать битумами или дегтем без особых трудностей. В производственных условиях на дороге рыхление тяжелых грунтов сопряжено с большими трудностями. Кроме того, для обработки таких грунтов требуется значительное количество вяжущего.

Для рыхления тяжелых грунтов и для смешения их с вяжущим требуется затратить настолько большое количество механической энергии, что предварительное введение в грунт песчаных добавок оказывается более целесообразным. При этом наряду с экономией на работе механизмов можно получить экономию на меньшем расходе вяжущего материала и меньшей толщине одежды, так как несущая способность глинистых и суглинистых грунтов в периоды наибольшего увлажнения основания (осенью и весной) меньше несущей способности других грунтов, за исключением пылеватых.

Не исключена возможность использования глинистых и тяжелосуглинистых грунтов при приготовлении грунт-асфальта при соответствующем режиме прогрева их и развальцовки.

Необходимо отметить, что генезис грунта имеет также большое значение, и поэтому нельзя руководствоваться при выборе грунта только его гранулометрическим составом. В этом отношении особенное внимание заслуживают черноземы.

Черноземы по гранулометрическому составу в своем большинстве относятся к тяжелым грунтам—глинистым и суглинистым, но содержание в их поглощающем комплексе гумусовых соединений и карбонатов кальция создают зернистую структуру, при наличии которой черноземы могут быть отнесены к грунтам, удобообрабатываемым органическими вяжущими материалами.

В районах распространения черноземов часто отсутствуют дорожностроительные материалы—камень, гравий, песок, а потому проблема стабилизации таких грунтов чрезвычайно актуальна. Подробно на свойствах черноземов здесь не оста-

навливаемся. Интересующихся отсылаем к ранее изданной нами книге, специально посвященной этому вопросу¹.

Песчаные грунты среднезернистые и крупнозернистые нецелесообразно обрабатывать органическими вяжущими материалами, так как вследствие такой обработки уменьшается коэффициент их трения, а в соответствии с этим уменьшается и их несущая способность в покрытии.

Грунты эти не набухают, а потому свойства их остаются практически стабильными и при изменении влажности.

Мелкие пески, которые вследствие малой фильтрующей способности и быстрого «заиливания» обычно бракуются для устройства оснований, могут быть использованы для устройства оснований после обработки их органическими вяжущими материалами. Для обработки мелкозернистых песков требуется мало вяжущего и меньше, чем для обработки других грунтов, затрат работы дорожных машин.

Мелкие пылеватые пески могут быть обработаны и использованы для устройства покрытий при обязательном устройстве поверхностной обработки.

Пылеватые грунты относятся к плохим в дорожном отношении грунтам. Они быстрее других грунтов насыщаются водой и при этом почти полностью теряют свою несущую способность. Однако после обработки органическими вяжущими материалами такие грунты резко изменяют свои свойства в лучшую сторону. Пылеватые грунты, вследствие своей малой связности, легко обрабатываемы. Некоторые пылеватые грунты, в частности лессы, по своему гранулометрическому составу близки к гранулометрическому составу заполнителей, применяемых для асфальтобетона, и в ряде случаев могут найти применение наряду с заполнителями, полученными в результате дробления каменных пород.

Лессы и лессовидные грунты распространены на юге Европейской части СССР, в УССР, а также в Западной Сибири и средне-азиатских республиках. В районах распространения лессов нет в достаточных количествах других дорожностроительных материалов—песка, камня, что, в свою очередь, выдвигает на первое место вопрос стабилизации их органическими вяжущими материалами.

Дороги, проходящие по лессам, а также лессовидным грунтам, обладают большой наклонностью к пылеобразованию и быстрой потере несущей способности при увлажнении. Это объясняется их суглинисто-пылеватым гранулометрическим составом, который характерен отсутствием частиц

¹ А. И. Лысихина, В. М. Безрук и Л. Н. Ястребова. Дорожные покрытия из чернозема. Изд. Дориздат, 1943.

$>0,25$ мм и сравнительно малым содержанием частиц $<0,005$ мм. Наличие в поглощающем комплексе таких грунтов большого количества кальция, коагулирующего глинистые частицы, и преобладание пылеватых фракций, — характеризует лессы как малосвязные грунты.

Пылеватые грунты, будучи по своей природе малосвязными грунтами, особенно склонны к сухой распутице, которая является следствием пересыхания грунта и соответственно полной потери им связности.

Так, например, слой пересохшего грунта в виде пыли на дорогах Средней Азии в районе распространения лессов иногда достигает 50 см и даже выше. Проезд автомашин при таких условиях становится почти невозможным. Машина буквально «тонет» в пыли. Мотор и другие части автомобиля забиваются пылью и вследствие этого быстрее выходят из строя. При таких условиях стабилизация грунтов органическими вяжущими материалами является единственным средством ликвидации мокрой и сухой распутиц.

Покрытия, сделанные из лесса и лессовидных грунтов, обработанных жидкими битумами методом смешения на дороге (в УзССР и ТадССР), позволили обеспечить круглогодичный проезд по дороге.

К пылеватым и легкосуглинистым пылеватым грунтам относятся весьма часто подзолистые почвы. Они легко разрыхляются и хорошо об'единяются с вяжущими материалами.

Подзолистые почвы распространены в северной части Союза. Такие грунты в общем неблагоприятны для дорожного строительства и в естественном состоянии мало пригодны для устройства грунтовой дороги.

При устройстве грунтовой дороги из подзолистых почв, назначаемой к обработке органическими вяжущими материалами, необходимо помнить, что это — грунты верхнего горизонта. Обычно при устройстве дороги машинодорожным отрядом верхние горизонты попадают в нижнюю часть насыпи, а в верхнюю часть вследствие этого попадают нижние горизонты, либо более суглинистые грунты, либо песчаные, менее пригодные для стабилизации. Поэтому в таких случаях верхний подзолистый горизонт следует сдвигать на сторону, используя его полностью или в смеси с грунтом нижнего горизонта для устройства покрытий.

Супеси по своей природе являются наиболее стабильными грунтами. Падение несущей способности при их увлажнении меньше, чем для других грунтов. Они легко обрабатываются вяжущими материалами и при этом требуют сравнительно небольших количеств его.

В результате проведенных нами исследований в лаборатории и на опытно-производственном строительстве были разработаны требования, которым должны удовлетворять грунты для дорожных покрытий, предназначенные к стабилизации органическими вяжущими материалами.

Количество глинистых частиц не должно превышать 15% (для структурных грунтов типа черноземов—30%). Предел текучести не выше 35 (для структурных разностей 40). Число пластичности не выше 15 (для структурных разностей—25).

Сравнивая приведенные данные с требованиями для грунтов, рекомендуемых для устройств покрытий или оснований, улучшенных только минеральными добавками, можно видеть значительное расширение пределов использования грунтов (табл. 6—8), и как раз за счет таких разновидностей (пылеватые грунты, черноземы), которые без обработки вяжущими считаются наиболее плохими грунтами.

3. Органические вяжущие материалы

Для стабилизации грунтов могут быть использованы различные органические вяжущие материалы: битумы, жидкие битумы, дегти и эмульсии. Выбор вяжущего обуславливается: назначением дороги, свойством самого грунта, выбранным методом работ, наличием оборудования, климатом и т. п.

Битумы вязкие могут быть использованы только при обработке грунта методом смешения в установке и укладки его в горячем состоянии по типу песчаного асфальта (грунт-асфальт). В этом случае обработанный грунт теряет все специфические строительные свойства грунта и приобретает свойства асфальта. Поэтому, пожалуй, грунт-асфальт следовало бы выделить в самостоятельную группу дорожно-строительных материалов и не смешивать со стабилизированным грунтом, у которого ряд строительных признаков остается одинаковым с необработанными грунтами, как, например, разрыхляемость и сыпучесть.

С другой стороны, грунт-асфальт можно рассматривать как высший метод стабилизации, а разрыхляемость, сыпучесть стабилизированных грунтов сравнивать со свойствами холодных асфальтов.

Требования на битумы для грунт-асфальта приведены в табл. 11.

Помимо указанных битумов, для грунт-асфальта могут быть использованы жидкие битумы и дегти, требования на которые приводятся ниже.

Таблица 11

Типы основания	Глубина проникания при 25°C
Щебеночное или гравийное	60—300
Грунтовое	20—300

Жидкие битумы находят наибольшее распространение при стабилизации грунтов, и потребление их для этих целей из года в год увеличивается. Основным преимуществом жидких битумов является возможность получить достаточно хорошее объединение их с грунтом при обработке непосредственно на дороге, а также при обработке в смесителе и укладке стабилизированного грунта в холодном состоянии. Со временем, в дорожной одежде, вязкость жидких битумов возрастает, в соответствии с этим свойства их приближаются к свойствам битумов.

Другим, не менее важным преимуществом жидких битумов является их большая транспортабельность, простота слива и приготовления на базе. Обычно приготовление готового жидкого битума на базе сводится к его подогреву до 60—80°C, тогда как для вязкого битума требуется произвести нагрев до 160—180°. Устройство базового хозяйства при использовании жидких битумов проще, так как может быть применен пароподогрев, что позволяет в значительной мере сократить расход на топливо и, кроме того, максимально механизировать производственные процессы на базе.

В 1943 г. утвержден ГОСТ 1972-43 на жидкие битумы, технические условия на которые приведены в табл. 12.

Жидкие битумы, густеющие со средней скоростью (класс А), всегда представляют собой разжиженные битумы, где в качестве разжижителей используются дестиллаты лигроино-керосиновых фракций нефти, выкипающие в интервале 170—300°C. К числу медленно густеющих жидких битумов могут быть отнесены: 1) битумы разжиженные, в которых основная часть фракций разжижителя выкипает при температуре свыше 300°C (нефти, мазуты, каменноугольное масло и т. п.); 2) остаточные продукты, полученные при переработке нефти (тяжелые крекинг-остатки, полугудроны и т. п.) и 3) тяжелые нефти, почти не содержащие дестиллатов бензина и керосина (естественные битумы). Жидкие битумы класса А в настоящий момент могут быть получены только путем приготовления на месте работ, а жидкие битумы класса Б могут быть получены в готовом виде по заявкам Неф-

Физико-химические свойства	Показатели по маркам											
	К л а с с А						К л а с с Б					
	АХ-1	АХП-2	АП-3	АГ-4	АГ-5	АГ-6	БХ-1	БХП-2	БП-3	БГ-4	БГ-5	БГ-6
Вязкость по вискозиметру с диаметром сточного отверстия 5 мм: при 25°C в сек., не более . . .	20	—	—	—	—	—	20	—	—	—	—	—
при 60°C в сек., в пределах . .	—	5—15	15—25	25—240	40—100	100—180	—	5—15	15—25	25—40	40—100	100—180
Фракционный состав в % по объ- ему перегоняется:												
до 225°C, не более	10	7	3	2	0	0	2	2	1	0	0	0
до 315°C, не более	35	25	17	14	8	5	20	15	10	5	2	0
до 360°C, не более	50	36	30	25	20	15	40	35	25	20	16	5
Свойства остатка битума после отбора фракций до 360°C:												
а) пенетрация в пределах . . .	100—300	100—300	100—300	100—300	100—300	100—300	Остаток жидкий, пенетрация опре- делена быть не может					
б) растяжимость (дуктильность) в см. не менее	600	60	60	60	60	60	—	—	—	—	—	—
Температура вспышки по Брен- кену в °C, не ниже	65	65	65	65	65	65	70	70	100	100	120	120
Содержание воды на месте про- изводства в %, не более							2	2	2	2	2	2
				с л е д ы								

Примечание. Для естественных жидких битумов содержание воды эмульсионной не нормируется.

теснабу или также приготовлены на месте работ, как разжиженные битумы.

Для приготовления разжиженного битума класса А, отвечающего техническим условиям, требуется битум с глубиной проникания 30—50, а для разжиженных битумов класса Б может быть использован дорожный битум любой марки.

Выбор марок жидких битумов для обработки грунтов показан в табл. 13.

Таблица 13

Метод обработки	Класс А (густеющие со сред. скоростью)						Класс Б (медленно густеющие)					
	АХ-1	АХП-2	АП-3	АГ-4	АГ-5	АГ-6	БХ-1	БХП-2	БП-3	БГ-4	БГ-5	БГ-6
Обеспыливание	—	—	—	—	—	—	+	—	—	—	—	—
Предварительный розлив . .	+	—	—	—	—	—	+	—	—	—	—	—
Поверхностная обработка . .	—	—	—	—	+	+	—	—	—	—	+	+
Смешение на дороге, оптимальные и пылеватые грунты	—	+	+	—	—	—	—	+	+	—	—	—
То же песчаные грунты . . .	+	—	+	+	—	—	—	—	+	+	—	—
То же оптимальные гравийные	—	—	+	+	—	—	—	—	+	+	—	—
Гравийные с малым содержанием пылеватых и глинистых частиц и укладка в холодн. состоянии	—	—	—	+	—	—	—	—	—	+	—	—
Смешение в установке, грунты оптимальные и пылеватые	—	—	—	+	+	—	—	—	—	+	+	—
То же песчаные	—	—	—	—	+	+	—	—	—	—	+	+
Смешение в установке: гравийные смеси оптимальных с укладкой в холодном состоянии	—	—	—	+	+	—	—	—	—	—	+	+
То же с малым содержанием пылеватых и глинистых частиц	—	—	—	—	+	+	—	—	—	—	—	—
Поверхностная обработка холодным асфальтом	—	—	—	—	+	+	—	—	—	—	+	+
Грунт-асфальт	—	—	—	—	—	+	—	—	—	—	—	+

Дегти. Качество стабилизированной дорожной одежды дегтями не уступает покрытию или основанию, обработанных жидким битумом. По степени изменять свою вязкость и вследствие этого и другие свойства дегти стоят ближе к жидким битумам класса А. Старение их во времени более интенсивное, поэтому для стабилизации грунтов следует применять дегти с вязкостью несколько меньшей, чем для жидких битумов.

Базируясь на практическом опыте, главным образом УССР, обработки грунтов дегтями, а также на исследованиях ДОРНИИ¹, можно рекомендовать для стабилизации грунтов дегти следующих свойств (табл. 14).

Дегти, отвечающие указанным требованиям, могут быть приготовлены на месте работ из каменноугольного пека и каменноугольного дорожного масла, известного под наименованием антраценового масла. В некоторых случаях могут быть получены сырые дегти, которые, в свою очередь, должны удовлетворять указанным требованиям.

Эмульсии относятся к числу жидких вяжущих материалов. Основное их преимущество—отсутствие необходимости подогрева. Благодаря этому значительно упрощается базовое хозяйство и облегчается смешение грунта с вяжущим.

Для обработки грунтов требуются эмульсии медленного распада. К сожалению, у нас в Союзе применение эмульсий еще не вышло из стадии опытов, хотя еще перед войной были разработаны рецепты битумных эмульсий и паст медленного распада.

Наибольшего внимания заслуживает эмульсия, для приготовления которой в качестве эмульгатора используется древесный деготь и едкий натр и пасты с эмульгатором из суглинка. Содержание битума в эмульсии составляет 50—64%. Эмульгатора—около 3—4% в эмульсии и до 20% в пасте, остальное вода. При обработке грунтов для облегчения перемешивания его с эмульсией последнюю в начале обработки целесообразно разбавлять водой в соотношении 1:1. Грунт перед обработкой должен быть предварительно увлажнен до предела раскатывания.

Вопрос использования эмульсий для стабилизации грунтов приобретает большое значение в связи с проблемой широкого внедрения грунт-асфальта. Если в настоящее время приготовление грунт-асфальта осуществляется в специальных смесительных установках горячим способом и при этом транспортные расходы составляют значительную часть сто-

¹ С. И. Гельфанд, Е. Н. Козлова. Отчет „Нестандартные вяжущие материалы“. ДОРНИИ, 1943.

Таблица 14

Марка дегтя	Д-1	Д-2	Д-3	Д-4	Д-5	Д-6
Способ обработки	Для обес- пыливания и предва- рительного розлива	Для обработки методом сме- шения на дороге легких и пылеватых суглинков	Для обработки методом сме- шения на дороге легких супесей и оптимальных грунтов. Для поверхностной обработки	Для обработки методом сме- шения на дороге песчаных грун- тов и для по- верхностной обработки грунтов	Для обработки методом сме- шения в установке с укладкой в холодном состоянии	Для обработки методом сме- шения в установке с укладкой в горячем состоянии
Свойства дегтя						
Удельный вес при 20°C, не менее .	1,08	1,10	1,12	1,12	1,15	1,15
Вязкость стандартным вискози- метром: ¹						
C ₃₀	До 30	30—80	—	—	—	—
C ₁₀₀	—	—	5—20	20—50	50—120	120—200
C ₅₀	—	—	—	—	—	—
Фракционный состав в % по весу:						
0—170°C, не более	7	5	3	1,5	1,5	1,5
0—270°C, не более	35	30	20	15	15	15
0—300°C, не более	45	50	30	25	25	25
Температура размягчения остатка по К и Ш после разгонки до 300°C, не более	60	25—60	30—65	30—65	30—65	30—65
Содержание свободного углерода в %, не более	13	18	20	20	20	20
Содержание воды в % по весу, не более ²	2,0	2,0	1,0	1,0	—	—
Температура применения в °C . . .	15—50	40—65 50—70	70—100	70—100	80—110	100—120

¹ Показатели вязкости даны при условии истечения материала из прибора в интервале 25—70 см³.

² Содержание воды нормируется только для составленных дегтей. В сырых дегтях может быть допущено большее количество.

имости грунт-асфальта, то при использовании эмульсий можно при обработке грунта методом смешения на дороге получить покрытие, которое по своим качествам будет аналогично горячему грунт-асфальту. В этом последнем случае отпадает перевозка грунта, хотя почти в два раза увеличиваются расходы по перевозке вяжущего по сравнению с обработкой грунта жидким битумом. Этот дополнительный расход получается ввиду необходимости перевозить воду и эмульгатор, входящие в состав эмульсии.

4 Свойства стабилизированных грунтов

Говоря о степени гидрофобизации грунта в результате его стабилизации органическими вяжущими материалами, необходимо остановиться на методах оценки свойств в итоге приобретаемых грунтом. К сожалению, существующие методы непосредственного определения степени гидрофобизации, например, методом теплоты смачивания, адсорбции и т. п., не могут быть использованы в лабораториях дорожного строительства ввиду сложности их выполнения даже для квалифицированных лаборантов. Поэтому при оценке свойств обработанного грунта определяются не физико-химические его свойства, а физико-механические, которые позволяют судить о свойствах стабилизированного грунта как дорожностроительного материала.

В настоящее время имеется ряд исследовательских работ и инструкций по вопросу определения физико-механических свойств обработанных органическими вяжущими материалами грунтов. Почти во всех работах советских исследователей: Яновского, Мачулина, Филатова, Безрук, Мельникова, Быковского, Волкова и др., подытоженных наиболее полно в работе Толстопятова¹, методика определения свойств обработанных грунтов общая.

Для оценки свойств стабилизированных грунтов производилось определение: объемного веса, полной и капиллярной влагоемкости, скорости размокания, водонасыщаемости под вакуумом, временного сопротивления сжатию в сухом и водонасыщенном состоянии и вдавливания штампа. В отдельных работах некоторые из этих определений отсутствуют.

Приготовление смесей из грунта и вяжущего и приготовление образцов производилось следующим образом: высу-

¹ Б. В. Толстопятов. Стабилизация несущей способности грунтов и обработка их битуминозными материалами. Сборник ДОРНИИ. «Стабилизация грунтов». Дориздат, 1938, Москва,

шенный на воздухе грунт растирался пестиком в чашке и просеивался через сито с отверстиями в 1 мм. Смешение грунта с битумом или дегтем производилось при нагревании грунта до 100° и выше. Температура вяжущего в момент добавки грунта у дегтей 130—140°, а у битумов 160—180°С. Смесь тщательно перемешивалась. Из приготовленной таким образом смеси готовятся образцы размером $d=25$ мм, $h=25$ мм. Прессование производилось на гидравлическом прессе с нагрузкой 30 кг/см². Продолжительность нагрузки в большинстве случаев не указывается.

Сопоставляя данные указанных исследователей с полученными нами данными при исследовании вырубок стабилизированного грунта из дорожных покрытий, мы убедились, что образцы, спрессованные под нагрузкой 30 кг/см², имеют значительно меньшую плотность (объемный вес), чем образцы из вырубок. Отсюда ясно, что и другие свойства образцов, приготовленных по вышеуказанной методике, будут значительно отличаться от свойств образцов из покрытия.

Поэтому нами наряду с определением объемных весов вырубок были определены объемные веса образцов из той же смеси, спрессованные под различной нагрузкой. Наибольшее совпадение получается для образцов, спрессованных при 300 кг/см² при продолжительности нагрузки 2 мин. В табл. 15 приведены данные объемных весов вырубок стабилизированных жидким битумом грунтов и переформованных образцов под нагрузкой 300 кг/см², с дороги Рублево — Успенское после пяти лет эксплуатации. В этой же таблице приведен гранулометрический состав грунтов после экстрагирования из смеси битума.

Таблица 15

Гранулометрический состав в %							Объемный вес	
> 2	2—1	1—0,5	0,5—0,25	0,25—0,15	0,15—0,074	< 0,074	Образцы из вырубки	Переформованного образца
6,49	3,75	15,42	21,41	27,5	10,28	15,13	2,04	2,69
3,38	3,42	18,67	26,88	20,72	7,80	19,06	2,0	2,03
6,8	5,79	17,71	14,41	21,6	9,69	25,29	2,11	2,16
10,21	4,52	18,90	22,38	22,25	7,38	14,44	2,20	2,08
4,81	4,48	18,58	23,01	21,87	9,60	17,62	2,18	2,14
8,07	3,22	17,51	20,81	24,02	9,29	22,06	2,18	2,11

Казалось бы, что вновь построенное покрытие должно было бы иметь значительно меньшую плотность. Однако образ-

цы, взятые с дороги, через месяц после постройки показали достаточно большую плотность. В табл. 16 приведены объемные веса скелета образцов стабилизированного жидким битумом грунта в рыхлом состоянии, после уплотнения катком и уплотнения движением. Здесь для сравнения приведены данные для тех же грунтов, не обработанных.

Т а б л и ц а 16

№ образца	Грунт земляного полотна			Стабилизированный грунт		
	рыхлый	уплотненный катком	уплотненный движением	рыхлый	уплотненный катком	уплотненный движением
1	1,18	1,92	—	1,05	1,81	1,95
2	1,34	1,49	—	1,16	2,16	2,20
3	—	1,93	2,07	1,18	1,75	2,03

Гранулометрический состав этих грунтов приведен в табл. 17.

Т а б л и ц а 17

№ образца	% ч а с т и ц			
	0,5—0,25	0,25—0,05	0,05—0,005	< 0,005
1	13,2	66,7	18,4	6,7
2	7,5	41,2	44,0	7,3
3	10,7	49,2	32,1	8,0

Величины объемных весов для грунтов, различных по своему генезису и гранулометрическому составу, очевидно, будут неодинаковыми так же, как неодинаковы будут и другие свойства. Для грунтов оптимального состава величины объемных весов при уплотнении образцов под нагрузкой 300 кг/см², а стало быть, и их плотность в дорожных покрытиях получается почти такая же, как и для песчаного асфальта.

В табл. 18 приведены величины объемного веса скелета для различных грунтов при стабилизации различным количеством жидкого битума.

Основной целью обработки грунтов органическими вяжущими материалами является увеличение их несущей способности в период мокрой распутицы весной и осенью и увеличение связности при сухой распутице в засушливых районах летом.

Таблица 18

Наименование грунта	% в я ж у щ е г о								
	0	3	5	6	7	8	9	10	11
Чернозем горловский	1,75	—	1,77	—	—	—	1,89	—	—
Суглинок подмосковный . . .	2,02	—	2,04	—	—	2,07	—	2,11	2,10
Супесь подмосковная	2,05	2,09	2,13	2,14	2,16	2,18	—	2,21	—
Подмосковный подзолистый горизонт	1,09	—	1,95	—	2,02	2,05	2,07	2,08	2,12
Иллювиальный горизонт . . .	2,0	—	2,11	—	2,15	2,16	2,17	2,18	2,19

Наименование грунта	% в я ж у щ е г о								
	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Чернозем горловский	1,94	—	—	1,92	—	—	—	—	—
Суглинок подмосковный . . .	—	—	—	2,01	—	—	1,95	—	1,89
Супесь подмосковная	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Подмосковный подзолистый горизонт	2,10	2,08	—	2,05	—	—	—	—	—
Иллювиальный горизонт . . .	2,12	—	2,08	—	—	—	—	—	—

В сухую погоду грунтовые дороги обладают весьма большой несущей способностью. С изменением влажности грунта изменяется и их несущая способность. При увеличении влажности до известных пределов несущая способность грунта даже увеличивается вследствие лучшей способности его уплотняться. Такая влажность называется «оптимальной», и для большинства грунтов, как это уже отмечалось выше, она близка к нижней границе пластичности (пределу раскатывания по Аттербергу). При увеличении влажности выше предела раскатывания несущая способность грунта начинает заметно уменьшаться и, достигая верхней границы пластичности—предела текучести, становится ничтожной. При влажности грунта свыше предела текучести происходит почти полная потеря несущей способности его.

Чем меньше будет изменяться несущая способность грунта при его увлажнении, тем стабильнее будут и другие свойства грунта. Термин «стабилизация грунта» указывает на постоянство свойств его с изменением влажности при достаточной величине сопротивляемости воздействию нагрузок.

Способность грунта изменять свой объем, а значит, и плотность скелета при набухании является тем злом для грунтовой дороги, которое и изменяет ее несущую способность.

При обработке грунта органическими вяжущими материалами изменяются физико-химические свойства грунта, его гидрофильность, а соответственно этому и его способность к набуханию.

Совершенно очевидно, что грунты, различные по своему генезису, гранулометрическому и агрегатному составу, при обработке их органическими вяжущими материалами будут не в одинаковой степени приобретать стабильные свойства и для максимальной стабилизации их потребуют не одинаковое количество вяжущего материала.

Свойства органических вяжущих материалов, в свою очередь, неодинаковы, а потому при обработке даже одного и того же грунта различными вяжущими материалами степень стабилизации его будет различной. Следовательно, несущая способность стабилизированного грунта будет зависеть от свойств самого грунта, качества и количества органического вяжущего материала, примененного для обработки.

Наибольшая несущая способность стабилизированного грунта будет при каком-то оптимальном количестве вяжущего в смеси. Выбор вяжущего материала обуславливается не только желанием получить наибольшую несущую способность стабилизированного в дорожной одежде грунта, но главным образом целесообразностью применения того или иного метода обработки. Так, например, применяя битум для тех же свойств, что и для песчаного асфальтобетона, можно получить сравнительно жесткое монолитное покрытие, по своим качествам приближающееся к типу асфальтобетонных покрытий. Для приготовления такого асфальтобетона, в данном случае грунт-асфальта, требуются соответствующие смесительные установки, а следовательно, и большое количество транспортных средств для перевозки готового грунт-асфальта на дорогу. Все это потребует значительных денежных затрат. Во многих случаях покрытие столь значительной прочности и вместе с тем и значительной стоимости устраивать нецелесообразно. При использовании простейших дорожных машин для целей стабилизации грунтов дороги—грейдеров, которыми можно произвести обработку грунта непосредственно на дороге, вяжущий материал может быть применен лишь такой вязкости, при которой обеспечивается достаточно равномерное и хорошее объединение его с грунтом, т. е. с меньшей вязкостью.

Из всего вышесказанного следует, что при оценке свойств

стабилизированных грунтов необходимо руководствоваться такими методами, которые с большей наглядностью отражают несущую способность стабилизированного грунта при возможно максимальном увлажнении его и в то же время позволяют определить оптимальные условия для стабилизации. Под оптимальными условиями следует понимать «оптимум вяжущего» в смеси и «оптимум влажности» грунта перед его обработкой.

Переходя к самой оценке свойств стабилизированных органическими вяжущими материалами грунтов, прежде всего следует остановиться на свойствах, методика определения которых будет общей как для грунтов, обработанных жидкими вяжущими материалами, так и вязкими. К таким свойствам следует отнести определение объемного веса и водонасыщаемости образцов с различным содержанием вяжущего в смеси.

Выше уже отмечалось, что объемный вес образца характеризует плотность стабилизированного грунта в дорожной одежде. Водонасыщаемость для грунтов, неспособных набухать после обработки их вяжущими, характеризует остаточную пористость. Чем больше объемный вес уплотненного образца и чем больше вяжущего в смеси, тем меньше величина его водонасыщаемости. Таким образом, для образцов стабилизированного грунта, лишенных способности к набуханию, существует зависимость между объемным весом, остаточной пористостью и водонасыщаемостью.

В тех же случаях, когда и после обработки органическими вяжущими материалами грунты (глинистые и суглинистые) в какой-то мере обладают способностью набухания, в соответствии с этим меняется и плотность скелета грунта при водонасыщении.

Для таких грунтов, если они обрабатываются горячим способом, целесообразно производить определение объемного веса и величину объемного набухания в процентах по формуле

$$N = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \cdot 100,$$

где: n_1 — объем образца до водонасыщения,
 n_2 — " " " после водонасыщения.

Водонасыщаемость вследствие набухания грунта может происходить медленно, а поэтому может оказаться, что для грунтов с большим содержанием глинистых фракций при набухании образца в течение одного часа ¹ величина водонасы-

¹ Как это принято по техническим условиям для песчаного асфальта.

щения будет меньше, чем для более легких грунтов. Поэтому для таких грунтов, если и можно производить определение величины водонасыщения, то следует сначала определить время, при котором образец достигает максимального значения.

При обработке грунтов жидкими вяжущими материалами определение величины объемного набухания не всегда может быть произведено по причине размокания образцов. Поэтому для таких грунтов целесообразно наряду с определением объемного веса производить определение несущей способности в водонасыщенном состоянии.

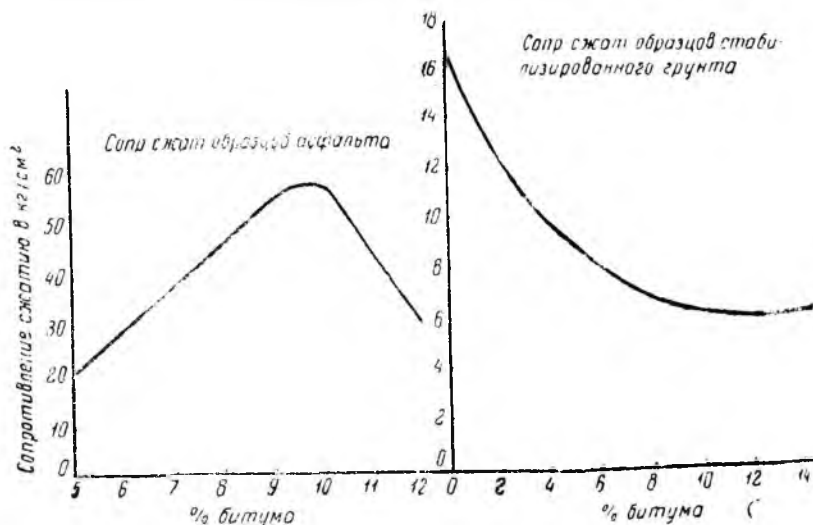


Рис. 4. Зависимость между сопротивлением сжатию и содержанием битума в смеси

Методика определения несущей способности грунтов, обработанных вяжущими материалами различной вязкости, будет различной. Для грунт-асфальта несущая способность может быть определена величиной временного сопротивления сжатию. Для грунтов, обработанных жидкими вяжущими материалами, определение сопротивления сжатию является показательным вследствие малых его величин, иногда даже близких к нулю, а также вследствие уменьшения сопротивления сжатию с увеличением вяжущего в смеси тогда как для образцов грунт-асфальта, также и вообще для асфальтового бетона, изменение сопротивления сжатию (зависимости от содержания вяжущего в смеси сначала возрастает, а затем, достигая максимума, падает (рис. 4). В этом случае А. И. Лысихиной предложено производить определе-

глубины погружения штампа в виде конуса для водонасыщенных образцов¹, имея в виду, что при оптимальном количестве вяжущего в смеси глубина погружения штампа будет минимальной.

Здесь так же, как и при определении величины сопротивления сжатию для образцов грунт-асфальта, фиксируется количество вяжущего, при котором несущая способность достигает максимума, т. е. величина деформации—глубина погружения штампа—получается минимальной (рис. 5).

На рис. 6 показан прибор, при помощи которого может быть определена глубина погружения штампа. Как видно, для этих целей использован прибор ВИКА, в котором игла заменена конусом.



Рис. 5. Глубина погружения штампа в зависимости от содержания битума

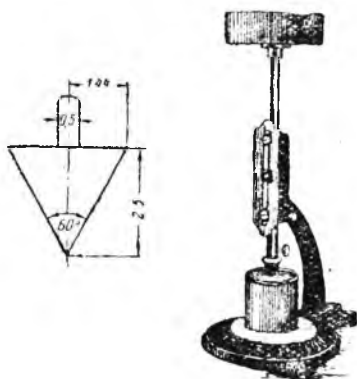


Рис. 6. Прибор для испытания штампом

Определение глубины погружения конуса производится следующим образом: образец стабилизированного грунта в форме (кольце) насыщается водой под вакуумом в продолжение четырех часов, после чего выдерживается в продолжение одного часа в кристаллизаторе с водой при температуре 18°C.

Водонасыщенный образец помещается на столлик прибора, конус опускается до поверхности образца и в этом положении закрепляется; при этом фиксируется отсчет по понусу. После этого дается нагрузка в 5 кг и конусу дают возможность под этой нагрузкой погружаться. Через 20 мин. от начала погружения производится отсчет. Разница в показани-

¹ Временная инструкция по лабораторным испытаниям грунтов, стабилизированных жидкими битумами. Рукопись. ДОЛНИИ, 1913.

ниях конуса между началом и концом погружения и является глубиной погружения.

Производя определения глубины погружения конуса для образцов с различным содержанием вяжущего, можно найти минимум глубины погружения, а соответственно этому optimum вяжущего материала в смеси. Этот метод достаточно объективен и благодаря своей простоте может быть рекомендован для производственных лабораторий.

5. Некоторые вопросы организации и производства работ при обработке грунтов органическими вяжущими материалами

По вопросам производства работ при стабилизации грунтов органическими вяжущими материалами имеется достаточно технической литературы, и сами методы производства внедрились в практику дорожного строительства. Поэтому в настоящей работе мы считаем необходимым остановиться лишь на некоторых вопросах, связанных спецификой отдельных операций.

Обработка грунтов вяжущими материалами методом смешения на дороге. Устройство основания или покрытия из стабилизированного грунта возможно как на вновь строящихся дорогах, так и при стадийных методах строительства с полным или частичным использованием грунта существующей дороги.

Производственный процесс при обработке грунтовых дорог в тех случаях, когда используется целиком грунт существующей дороги или земляного полотна, складывается из следующих операций:

А. Подготовительные работы

1. Очистка существующего покрытия от пыли и грязи.
2. Кирковка и исправление профиля.
3. Разрыхление вскиркованного грунта и подготовка его под розлив.

Б. Основные работы

1. Розлив вяжущих материалов в несколько приемов.
2. Предварительное смешение грунта с вяжущими после каждого розлива бородами и грейдером.
3. Окончательное смешение грейдерами.
4. Разравнивание готовой смеси с приданием профиля.

В. Отделочные работы

1. Утюжка.
2. Уплотнение катками.

В тех случаях, когда покрытие или основание устраивается из грунта, взятого со стороны, например, при увеличении отметки поверхности дороги, производственный процесс изменяется только в части подготовительных работ.

Подготовительные работы

1. Очистка от пыли и грязи поверхности основания.
2. Ремонт и планировка поверхности основания.
3. Предварительный розлив вяжущего (для тонкослойных покрытий).
4. Россыпь грунта, предназначенного для обработки.
5. Подготовка россыпи под розлив.

Основные же и отделочные работы остаются без изменения.

При частичном использовании грунта земляного полотна или дороги изменения производственного процесса происходит тоже только в части подготовительных работ.

Подготовительные работы

1. Очистка от пыли и грязи.
2. Кирковка и исправление профиля.
3. Разрыхление вскиркованного материала.
4. Россыпь добавок.
5. Смешение добавок с основным грунтом и подготовка под розлив.

Организации работ при стабилизации грунтов должно быть уделено большое внимание. Только правильно выбранное оборудование, увязка работы отдельных дорожных машин и правильная расстановка рабочей силы позволяют с наименьшими затратами дать максимальную производительность. Поскольку отдельные производственные операции являются непрерывным потоком одного процесса—устройства покрытия или основания, обработанного вяжущим методом смешения, то этот поток должен быть организован так, чтобы в итоге за один или другой отрезок времени получить готовый участок дороги наибольшей протяженности.

Если исходить из предположения, что производительность базы по приготовлению вяжущего не ограничивает производительности работ на линии, то при составлении плана организации работ необходимо решить вопрос, какие из дорожных машин являются ведущими, а затем уже, исходя из производительности ведущих агрегатов, должна определяться потребность в других машинах.

Необходимо произвести расстановку машин так, чтобы в итоге получить их максимальную производительность в об-

щем потоке, а не использовать максимальную производительность одной какой-нибудь машины.

Для определения производительности гудронатора или другого распределителя вяжущего необходимо исходить из заданной нормы розлива вяжущего, средней дальности возки вяжущего, длины обрабатываемого участка и числа розливов вяжущего. Следует помнить, что меньше одного литра на 1 м^2 за один прием осуществить розлив трудно, особенно, если розлив вяжущего производится не гудронатором. При увеличении же нормы розлива за один прием сокращается длина обрабатываемого участка и соответственно уменьшается производительность машин по смешению. При наличии нескольких распределителей можно увеличивать норму лишь первого розлива, но не свыше $4,5 \text{ л/м}^2$, большая норма розлива ухудшает условия смешения.

При рассмотрении отдельных производственных операций следует несколько остановиться на введении добавок, улучшающих гранулометрический состав песчаных грунтов. Ввиду большой свободной поверхностной энергии глинистых и до некоторой степени и пылеватых частиц грунта при обработке грунта оптимального состава эти частицы раньше песчаных оказываются обволокнуты вяжущими. Глинистые и пылеватые частицы энергично адсорбируют битум даже в больших количествах, чем это требуется для стабилизации грунта, и требуется большая затрата механической энергии, чтобы этот «избыток» битума был отдан песчаным частицам. Поэтому, обрабатывая сначала только песчаные частицы, которые в отдельности быстрее, чем глинистые, смешиваются с вяжущим материалом, а затем, вводя более дисперсные частицы (пылеватые, глинистые), можно получить лучшее качество смешения с меньшей затратой работы машин. И только после смешения добавок с обработанным песчаным грунтом вводится недостающее количество вяжущего материала.

Устройство покрытия или основания из грунт-асфальта аналогично устройству покрытий или оснований из песчаного асфальта. В этом случае наряду с вопросами производства работ на линии большое место в плане организации работ должно быть отведено приготовлению самого грунт-асфальта.

Производственные операции по приготовлению грунт-асфальта следующие:

1. Заготовка грунта.
2. Прогрохотка грунта через грохот с отверстием 5---10 мм.
3. Приготовление вяжущего материала.
4. Просушка грунта.

5. Смещение грунта с вяжущим.

На этом, собственно, и кончается приготовление грунт-асфальта. Далее грунт-асфальт из смесителя поступает в кузов автомашины и в горячем состоянии перевозится на линию. Производственный процесс по устройству покрытия или основания складывается из следующих операций:

1. Подготовка основания.

2. Укладка и разравнивание горячей смеси грунт-асфальта.

3. Укатка.

При приготовлении грунт-асфальта наиболее специфичной операцией является просушка грунта перед смешением его с вяжущим материалом.

Обычно при приготовлении асфальтобетона или песчаного асфальта минеральный материал в сушильном барабане подогревается до $150\text{--}180^{\circ}\text{C}$. При приготовлении грунт-асфальта грунт подогревают до температуры $130\text{--}190^{\circ}$, в зависимости от влажности грунта.

Нам кажется, что температура прогрева грунта имеет весьма большое значение, и, говоря об оптимальных условиях обработки грунта вязкими вяжущими материалами горячим методом, необходимо наряду с определением оптимального количества вяжущего говорить и об оптимуме температуры прогрева. Это станет понятным, если будут учтены работы по стабилизации свойств грунта прогревом. Работами В. М. Безрук¹ установлено, что под влиянием прогрева коллоидная часть грунта как бы сворачивается, при этом изменяется дисперсность грунта и пластичность его по Аттербергу. Процесс этот не обратимый. Для различных грунтов температура стабилизации грунтов прогревом не одинакова и лежит в пределах $300\text{--}500^{\circ}\text{C}$.

Раз это так, то, видимо, регулируя режим прогрева, можно получить грунт требуемых свойств и, что самое главное, при таком положении вещей для приготовления грунт-асфальта можно будет использовать тяжелые грунты. При прогреве глинистых и тяжело суглинистых грунтов может иметь место комкование. Соответствующая установка вальцов в смесительной камере легко размельчит комки грунта до требуемых размеров.

В соответствии с изменением гранулометрического состава грунта изменяется и оптимум вяжущего материала для него. В этом случае его иногда потребуется меньше. Все вышеизложенное позволяет нам выдвинуть проблему комбиниро-

¹ В. М. Безрук. Стабилизация несущей способности грунтов прогревом. Сборник ДОРНИИ. „Стабилизация грунтов“. Дориздат, 1938, Москва.

зашной стабилизации грунта--спачала прогревом, а затем уже органическим вяжущим материалом. Ближайшее будущее покажет, в какой мере выдвинутая проблема может быть осуществлена на практике.

Смешение в установке и укладка смесей в холодном виде (холодный грунт-асфальт) имеет ряд своих преимуществ перед смешением на дороге, а именно: перемена погоды не оказывает особого влияния на заготовку смесей; продолжительность сезона, пригодного для работы, возрастает; не требуется закрывать движение на обрабатываемом участке; возможна, если требуется, просушка грунта; можно применять более вязкие вяжущие материалы; дозировка грунта и вяжущего производится более точно (по весу); расход вяжущего может быть несколько уменьшен.

Производственный процесс состоит в этом случае из следующих операций:

1. Приготовление смеси и приготовление ее в случае необходимости на базе.
2. Перевозка смеси автомобилями к месту работ.
3. Предварительный розлив вяжущего.
4. Разравнивание смеси грейдером или россынь при помощи специальных распределителей.
5. Утюжка.
6. Укатка.

Схема технологического процесса приготовления холодного грунт-асфальта, по существу, остается такой же, как и при приготовлении горячего грунт-асфальта. Изменяется лишь вязкость вяжущего материала.

Г Л А В А IV

ОБРАБОТКА ГРУНТОВ НЕОРГАНИЧЕСКИМИ ВЯЖУЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Как показывает опыт дорожного и аэродромного строительства последних 10—12 лет, для обработки грунтов с успехом могут применяться портланд-цемент и известь. Особенно большой эффект получается при укреплении грунта портланд-цементом. Первые опыты по обработке грунта цементом с целью постройки грунто-цементной дороги были произведены в США в 1934 г. (штат Южная Каролина). Благоприятные дорожные свойства грунто-цементных покрытий, простота и дешевизна их постройки сразу же привлекли внимание к этому новому методу строительства облегченных

дорог. Масштабы строительства грунто-цементных дорог из года в год все возрастают. К концу 1943 г. в США общая протяженность грунто-цементных дорог достигла более 1000 км; кроме того, построено до 10.000.000 м² грунто-цементных покрытий на аэродромах. Помимо США, строительство грунто-цементных покрытий осуществляется в Южной Америке, Китае, Англии и других странах. При этом следует отметить, что покрытия из грунто-цемента, уложенные в самых разнообразных климатических зонах и при разных грунтах, оказались весьма устойчивыми.

В Советском Союзе первый большой опыт с применением грунто-цемента в основании покрытия был осуществлен в 1939 г. на территории Всесоюзной сельскохозяйственной выставки. Площадь обработанных грунтов (тяжелые супеси обрабатывались шлаковым портланд-цементом) была равна 20.000 м², результаты опыта получились вполне удовлетворительные.

В 1942 г. в Ульяновской области ДОРИИ Гущосдора НКВД был построен опытный участок дороги с грунто-цементным покрытием из чернозема, обработанного портланд-цементом и пуццолановым портланд-цементом. Наблюдениями, проведенными после 1½-годовой эксплуатации дороги, установлено хорошее состояние и малый износ грунто-цементного покрытия на данном участке. При этом хорошее состояние покрытия наблюдалось как на секции, обработанной портланд-цементом марки 100, так и на секции, обработанной пуццолановым портланд-цементом марки 250.

Внедрение в дорожное строительство описываемого нового метода стабилизации грунтов, представляет большой научный и практический интерес, ибо в корне ломает установившееся представление о вредном влиянии глинистых частиц на вяжущие свойства цемента. Исследовательские работы, проведенные в этом направлении, а также и многочисленные практические наблюдения опровергают установившийся взгляд об антагонизме глины и цемента.

В настоящее время можно считать твердо установленным факт благоприятного и длительного воздействия цемента и извести на физико-механические свойства грунтов самого различного генезиса и гранулометрического состава. Лишь в отдельных случаях (о чем см. ниже) физико-химическое состояние грунта может оказывать отрицательное влияние на вяжущие свойства цемента или извести.

Современные наши знания о грунтах позволяют предполагать вредные влияния отдельных составных частей его, и поэтому можно всегда заранее решить возможность обработки цементом той или иной разновидности грунтов.

1. Физико-химические взаимодействия грунта и цемента

Как известно, портланд-цемент является наиболее распространенным и наиболее высококачественным вяжущим материалом. Высокая реакционная способность цемента объясняется процессами гидролиза и гидратации, которые происходят с кальциевыми соединениями при замешивании цемента с водой. В результате гидролиза и гидратации образуются гидросиликаты и гидроалюминаты, которые выделяются в виде коллоидных соединений, характеризующихся почти полной нерастворимостью в воде (реакции необратимого порядка).

Коллоидная структура, обладающая большой удельной поверхностью и поглощенными на поверхности частиц катионами, способность последних к реакциям обмена с катионами растворов.—эти свойства характерны как для цементов, так и для тонкодисперсной части грунтов. Отсюда следует, что при обработке грунта цементом процессы гидролиза и гидратации, а также и другие химические реакции будут усиливаться или, наоборот, замедляться, в зависимости от естественно-исторической природы грунта и его физико-химического состояния в момент обработки.

Так, например, наличие в грунте поглощенных водородных ионов, способных к обмену, или присутствие их в грунтовом растворе в результате диссоциации гумусовых кислот (кислый адсорбтивно ненасыщенный гумус болотных и пелудболотных, а отчасти и подзолистых грунтов) является фактором, отрицательно действующим на твердение цемента. Водородные ионы, вступая в коллоидный остов цемента, содержащий ионы кальция, могут видоизменить выпавший гель путем диспергирования и растворения его.

Исследованиями Вигнера¹, Гесснера установлено, что кислая реакция грунта с рН ниже 6 и высокая обменная кислотность действуют разрушающим образом на цемент.

Следующим ионом, изменяющим структуру гелей, является натрий, который гидратирует и диспергирует грунты в очень сильной степени. Отсюда, присутствие его в поглощающем комплексе грунта будет также вредно сказываться на свойствах цемента, введенного в качестве цементирующей добавки. Кроме того, присутствие натрия в грунте может вызвать образование сернокислого натрия, очень быстро и интенсивно разрушающего цемент. Высокое содержание сульфатов в грунте (свыше 0,2% SO_3 , растворимого в горячем растворе соляной кислоты) недопустимо при обработке его

¹ Г. Вигнер. Избранные работы. Сельхозгиз, 1941.

цементом, ибо может способствовать образованию гипса. Также недопустимо высокое содержание магния при цементации грунта (свыше 2% MgO, растворимого в горячем растворе соляной кислоты).

Наличие в поглощающем комплексе грунта иона кальция производит обратное действие, так как последний коагулирует коллоидные золи и переводит их в мало подвижную форму, в силу чего создаются условия, способствующие максимальному проявлению вяжущих свойств цемента. Кроме того, благодаря наличию поглощенного кальция в грунте обычно в последнем образуется микроагрегатная структура, что облегчает обработку грунта и делает ее более эффективной.

Так, например, черноземные грунты дают весьма большой эффект при обработке их цементом, что объясняется наличием поглощенного кальция и макро- и микроагрегатной структурой этого грунта.

Физико-механические свойства грунтов, обработанных цементом, резко отличаются от первоначальных свойств и характеризуются, например, следующим временным сопротивлением сжатию (определенным на образцах, подвергнутых 5-кратному водонасыщению и высушиванию) (табл. 19).

Т а б л и ц а 19

**Временное сопротивление сжатию грунто-цементных смесей
(в кг/см²)**

Наименование грунта	Портланд-цемент марки 400		Пуццолановый портланд- цемент марки 250	
	процент добавки цемента			
	8	12	8	12
Покровный суглинок тяжелый	62,3	88,2	42,6	46,2
Супесь моренная . . .	29,8	43,5	—	—
Чернозем обыкновенный тяжело-суглинистый .	23,7	37,6	—	—
Чернозем деградирова- нный суглинистый . .	23,4	30,4	6,0	7,8

Таким образом, если необработанные грунты при испытании их на размокание распадаются через 10—30 мин., то те же грунты при обработке их в надлежащем количестве цементом приобретают не только водостойчивость, но и обладают достаточной несущей способностью даже после многократного полного их водонасыщения и высушивания.

Степень стабилизации и водоустойчивость грунто-цементных смесей возрастают с увеличением добавки цемента.

В последние годы коллоидо-электрохимическим институтом Академии наук СССР разработан метод закрепления грунтов гидрофобным грунто-цементом¹. Сущность этого метода заключается в комплексном воздействии на грунт цемента и технического мыла (мылонафта). При этом цемент обеспечивает механическую прочность и устойчивость обработанного грунта, а мылонафт или другие какие-либо технические мыла придают грунту «гидрофобность». При взаимодействии с ионами кальция, переходящими в раствор при гидратации цемента, мыла образуют на свободных поверхностях частиц грунта и цемента пленку нерастворимых в воде и не смачивающихся водой кальциевых мыл. Эти пленки, образуясь в порах грунто-цементной смеси, благодаря своей несмачиваемости водой (гидрофобности) придают обработанному грунту свойство водонепроницаемости. Таким образом, в отличие от обычного метода цементации грунта, при котором последний приобретает водоустойчивость и высокую механическую прочность как в сухом, так и во влажном состоянии, метод гидрофобного грунто-цемента, помимо водоустойчивости и механической прочности, сообщает грунту пониженную влагоемкость и практическую водонепроницаемость. Последние два свойства весьма ценны при использовании грунто-цементной смеси как в дорожном покрытии, так и в основании. Отсюда следует, что указанный способ обработки грунта является более совершенным методом, чем обычная цементация грунта, и целесообразность его применения не вызывает сомнений, тем более, что проведенные КЭИН-ом и ДОРНИИ лабораторные исследования подтверждаются полевыми опытными работами.

Метод гидрофобной цементации имеет свои специфические особенности в производстве работ, о которых указано несколько ниже.

2. Подбор и испытание грунто-цементных смесей

Устойчивость грунто-цементных покрытий и оснований к влиянию атмосферных факторов и воздействию нагрузок, возникающих при движении транспортных средств по дороге, во многом зависит от правильного лабораторного подбора грунто-цементных смесей.

¹ Проф. Николаев, Л. Г. Есрг и др. Гидратация грунтов водонепроницаемости и механической прочности. Изд. Акад. Наук. 1942.

Прежде чем приступить к строительству названного типа покрытий или оснований, необходимо предварительно в лаборатории установить:

- а) количество добавляемого в грунт цемента;
- б) оптимальную влажность грунто-цементной смеси в период ее уплотнения;
- в) степень уплотнения готовой смеси.

Особое внимание уделяется определению количества воды, добавляемой в грунто-цементную смесь. Лабораторные испытания весьма просты и могут быть осуществлены при помощи простейшего оборудования.

Для качественной оценки грунто-цементных смесей и установления добавляемого к грунту цемента в Соединенных Штатах Америки выработана следующая методика.

Образец грунта сушится на воздухе, размельчается и просеивается через сито № 4 (4,6 мм). В начале определяется соотношение влажности—плотности и по графику устанавливается оптимальная влажность и максимальная плотность для естественного грунта.

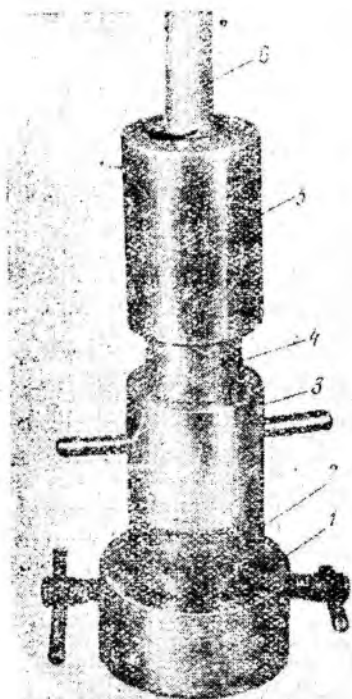
Максимальная плотность и оптимальная влажность естественного грунта служат для определения аналогичных данных для смесей грунта и цемента, а также используются при изготовлении образцов для испытаний. Для каждой дозировки цемента (например, 8, 10 и 12%) приготавливаются по 4 образца: 2 образца подвергают испытанию на водонасыщение—высушивание; остальные два—на замораживание—оттаивание, причем предварительно производится капиллярное насыщение водой этих образцов. Производится не менее 12 циклов этих испытаний. Методика этих определений строго регламентирована специальными стандартами.

Перечисленный цикл испытаний весьма длителен и занимает по времени не меньше одного месяца. Это обстоятельство затрудняет проведение необходимого лабораторного исследования, и поэтому вполне понятными являются поиски и разработка более краткой и менее громоздкой методики подбора и качественной оценки грунто-цементных смесей. Такая методика, разработанная лабораторией ДОРНИИ, описывается ниже.

Определение оптимальной влажности и максимальной плотности грунта. Средняя проба воздушно-сухого грунта весом не менее одного килограмма помещается в хорошо закрывающийся широкий сосуд. Взятую навеску грунта увлажняют до влажности 6% и перемешивают. Перед началом опыта для контроля берется проба на влажность. Для определения влажности—плотности грунта пользуются специальным прибором, который состоит из (см.

рис. 7): 1) подставки с двумя закрепляющими винтами; 2) разъемного цилиндра для загрузки образца с объемом, равным 100 куб. см; 3) направляющего насадного цилиндра; 4) плунжера, передающего ударную нагрузку; 5) гири весом 2,5 кг, сбрасываемой с высоты 30 см; 6) направляющего стержня и 7) рукоятки.

Увлажненный грунт (в данном случае до 6%) всыпается в разъемный цилиндр 2, который перед этим должен быть



вставлен в подставку 1 и зажат винтами. После этого надевается насадный цилиндр 3, и грунт насыпается до верхнего края формы. Затем вставляется плунжер 4 с направляющим цилиндром и грунт, заключенный в форму, уплотняется ударами гири 5 весом 2,5 кг сбрасыванием ее с высоты 30 см в количестве 30 ударов.

Произведя уплотнение, плунжер 4 и насадный цилиндр осторожно снимают и поверхность грунтового образца тщательно срезают до уровня краев разъемного цилиндра; образец грунта вынимается и взвешивается с точностью до 0,1 г.

Повышая постепенно влажность грунта на 2%, опыт с уплотнением производят до того момента, когда вес образца не станет уменьшаться. Повывив после этого влажность грунта еще на 2%, и определив его объемный вес

Рис. 7. Прибор для приготовления образцов

и взяв пробу на влажность, опыты на этом заканчивают.

Установив (после высушивания проб на влажность) влажность грунта в начале опыта и в конце его, вычисляют объемный вес влажного грунта, а затем объемный вес скелета грунта по формуле:

$$V = \frac{V_s}{1 + W},$$

где V_c — объемный вес сухого грунта в г/см³,
 W — весовая влажность в долях единицы,
 V_b — объемный вес влажного грунта в г/см³.

Полученные результаты изображаются графически, причем объемные веса сухого грунта откладываются на оси ординат, а влажность (в % по весу) — по оси абсцисс. Наивысшая точка кривой показывает оптимальную влажность и соответствующую ей максимальную плотность для данного грунта.

Оптимальная влажность — это влажность, при которой достигается наибольшая плотность грунта при минимальной затрате работы на уплотнение. Представление об изменении влажности и плотности грунта дают данные, приведенные в табл. 20.

Таблица 20

Изменение объемного веса (плотности) грунтов в зависимости от влажности

Наименование грунта или смеси	В л а ж н о с т ь г р у н т а в %														
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Покровный суглинок тяжелый	1,67	—	1,78	—	1,83	—	1,83	—	1,78	—	1,72	—	1,63	—	—
Покровный суглинок + 12% портланд- цемента	—	—	1,68	—	1,80	—	1,83	—	1,78	—	1,75	—	1,67	—	1,61
Чернозем обыкно- венный тяжело- суглини- стый	—	—	—	1,58	—	1,72	—	1,76	—	1,72	—	1,65	—	—	—
Чернозем обыкно- венный + 8% портланд- цемента	—	—	—	1,58	—	1,60	—	1,63	—	1,65	—	1,62	—	1,61	—

Установив оптимальную влажность и максимальную плотность для естественного грунта, повторяют это определение для смесей грунта с добавками цемента. Это определение производится в обязательном порядке, учитывая тот факт, что оптимальная влажность и максимальная плотность, установленные для наилучшей смеси грунта с цементом, впоследствии должны будут строго соблюдаться при производстве работ по смешению и уплотнению грунто-цемента на дороге.

Приготовление образцов и испытание грунто-цементных смесей. Образцы для испытаний, в результате которых устанавливается количество добавляемого цемента, приготавливаются в описанном выше приборе. При этом при трамбовании образцов строго соблюдается оптимальная влажность, установленная ранее для этой смеси. Смесь готовится в количестве 2 кг, причем требуемое количество цемента и грунта берется в весовых процентах, например, 4, 8 или 12%.

Образцы для испытаний готовятся в количестве 10 шт., после чего они помещаются для гидратации цемента на сетку в эксикатор с водой или же во влажные опилки, где и хранятся в течение 7 дней.

Экспериментальные работы, проведенные в лаборатории ДОРНИИ, позволяют рекомендовать следующие испытания грунто-цементных образцов: 1) 5-кратное испытание на водонасыщение—высушивание с последующим определением процента потери в весе образца; 2) 5-кратное испытание на водонасыщение—высушивание с последующим определением процента влагоемкости и набухания образца. Методика этих определений следующая.

Испытание на водонасыщение — высушивание. Три образца, приготовленные из грунто-цементной смеси в описанном выше порядке (стр. 72), после 7-дневного влажного хранения высушиваются до постоянного веса при 105°C, взвешиваются и погружаются в воду на 5—6 час. Через 5 час. образцы вынимаются из воды, снова высушиваются при 105°C до постоянного веса, после чего вынимаются из термостата и дважды (со всех сторон) обтираются щеткой для отделения частиц, потерявших связность с образцом. Затем производят взвешивание сухого образца и снова погружают его в воду на 5—6 час., высушивают и обтирают дважды щеткой. Таких циклов водонасыщения—высушивания производят пять.

Зная вес сухого образца до испытания и вес этого же образца после 5-го цикла водонасыщения—высушивания, вы-

числяют процент потери в весе образца, принимая за его вес сухого образца перед испытанием.

Образцы, имеющие потерю в весе после 5 циклов испытания не более 5%, характеризуют собой смеси, устойчивые в дороге. Смеси, имеющие потерю в весе более 5%, считаются не пригодными для применения их в дорожное покрытие.

Ниже приводятся результаты этого вида испытаний, проведенные на различных грунто-цементных смесях (табл. 21).

Таблица 21

**Испытание грунто-цементных смесей на водонасыщение —
высушивание**

Наименование грунта	Портланд-цемент марки 400				Пуццолановый портланд- цемент марки 250			
	% д о б а в к и ц е м е н т а							
	6	8	10	12	6	8	10	12
Покровный суглинок тяжелый	+	+	+	+	—	+	+	+
Супесь пылеватая . . .	+	+	+	+	—	+	+	+
Чернозем обыкновенный тяжело-суглинистый .	—	+	+	+	—	—	—	+
Чернозем деградиров. суглинистый	—	+	+	+	—	—	—	+

Знаком плюс (+) отмечены смеси, выдержавшие 5 циклов испытаний и имеющие потерю в весе менее 5%.

Знаком минус (—) отмечены смеси, не выдержавшие испытания и имеющие потерю в весе более 5%.

Результаты испытаний на водонасыщение — высушивание, приведенные в табл. 21, показывают, что на устойчивость смеси оказывает влияние как гранулометрический состав грунта, так и марка цемента. Чем тяжелее грунт, тем больше требуется цемента для придания ему соответствующей прочности. С другой стороны, чем выше марка цемента, тем меньшее его количество придает устойчивость грунто-цементной смеси.

Испытание на набухание и влагоемкость. Три образца после 7-дневного хранения высушиваются до постоянного веса при 105°C, после взвешивания определяется объем образца. Для определения последнего можно пользоваться прибором Богданова. После этого образцы погружаются в воду на 5—6 час., затем их осторожно вынимают и определяют вес и объем влажного образца. Затем образец высу-

шнвается, взвешивается и снова насыщается и набухает в воде в течение 5 час. Такие циклы повторяют пять раз, после чего вычисляют процент водопоглощения и процент набухания. Смесь считается устойчивой и пригодной для производства, если процент водопоглощения не превышает оптимальной влажности, принятой для этой смеси более чем на 2%. Набухание не должно превышать 3% от объема сухого образца.

Результаты этого испытания близки к данным на водонасыщение—высушивание. Добавка 8, а иногда и 6% цемента бывает достаточной, чтобы обеспечить указанную водопоглощаемость и набухание грунто-цементных смесей. При этом, как и в предыдущем случае, на количество добавляемого цемента влияет как гранулометрический состав грунта, так и марка цемента.

3. Основные правила производства работ по цементации грунтов

Для получения хороших результатов при устройстве грунто-цементных покрытий или оснований из обработанного грунта требуется соблюдение следующих основных правил, от выполнения которых зависит прочность, погодоустойчивость и сопротивляемость износу такого рода покрытий.

1. Постройка грунто-цементных покрытий только при преобладающем автомобильном движении.

2. Введение достаточного количества цемента, способного вызвать твердение грунто-цементной смеси до заданной прочности и равномерное распределение его в массе обрабатываемого грунта.

3. Уплотнение грунто-цементной смеси до установленной максимальной плотности со строгим поддержанием оптимальной влажности смеси в период ее уплотнения.

Как правило, работы по постройке грунто-цементных покрытий и оснований производят по методу смешения на месте. Эти работы включают в себя ряд последовательных операций, которые рекомендуется производить в следующем порядке.

1. Разрыхление и размельчение грунта. Разрыхление грунта производится при помощи кирковщиков, рипперов и вспашкой плугом; размельчение — дисковыми игольчатыми, пружинными боронами или фрезами. Размельчение последовательными проходами снарядов производится до тех пор, пока грунт в основном не будет размельчен до комочков размером менее 3 мм. Особенно большую производительность дают фрезы, которые после 2—3 проходов обеспечивают необходимое размельчение грунта.

В тех случаях, когда предполагается обрабатывать грунт по методу гидрофобной цементации, целесообразно увлажнить сухой грунт раствором мыл^а на ф^та или другого ка-кого-либо технического мыла соответствующей концентрации.

При обработке связных сильно глинистых грунтов желательно в процессе рыхления грунта вносить гранулометрические добавки песка или гравийного материала. Внесение скелетных добавок повышает устойчивость грунто-цементных смесей, уменьшает количество добавляемого цемента, облегчает производство работ по смешению и разрыхлению грунто-цементных смесей.

2. Россыпь цемента. Для обработки грунтов допустимо применять цемент любой марки, однако следует иметь в виду, что применение цемента высокой марки снижает потребное его количество для обработки, и, наоборот, используя цемент низких марок, необходимо будет ввести его в грунт в большем количестве.

Россыпь цемента производится либо вручную, либо при помощи сеялок или других специальных машин.

Если цемент доставляется на дорогу в мешковой таре, то мешки с цементом раскладывают по длине участка на равных расстояниях, определяемых расчетом. Количество потребного цемента устанавливается предварительными лабораторными испытаниями и в зависимости от качества грунта и цемента может колебаться от 6 до 15% по объему грунта.

Глубина обработки, как правило, равняется 15 см, но может быть изменена в ту или другую сторону, в зависимости от требований, предъявляемых к строительству.

Перед россыпью цемента проверяют влажность обрабатываемого грунта, и если таковая превышает более чем на 2% влажность границы раскатывания, установленную для данного грунта, производят подсушивание его путем дополнительного перемешивания. Как показал наш опыт, большая влажность грунта затрудняет равномерное распределение цемента и перемешивание готовой смеси.

3. Смешение цемента с грунтом. Смешение производят полевыми культиваторами, плугами, боронами до полной однородности смеси. После смешения грунта и цемента определяется влажность смеси; если она оказывается недостаточной, то смесь равномерно поливают водой в количестве, необходимом для доведения смеси к оптимальной влажности, которая устанавливается предварительными испытаниями, описанными выше.

Оптимальная влажность грунтов для различных грунто-цементных смесей примерно характеризуется следующими величинами:

а) для грунтов песчаных	8—12%
б) для грунтов супесчаных	10—15%
в) для грунтов суглинистых и пылеватых	14—20%
г) для грунтов тяжело-суглинистых и глинистых	18% и выше

В тех случаях, когда обработка грунта производится по методу гидрофобной цементации, увлажнение смеси до оптимальной влажности производят не водой, а раствором мылонафта или другого какого-либо поверхностно-активного органического вещества, могущего придать гидрофобность обрабатываемому грунту. Для этой цели обычно бывает достаточно вводить от 0,3 до 0,5% мылонафта от веса сухого грунта, т. е. концентрация применяемого раствора мылонафта должна назначаться с учетом влажности обрабатываемого грунта.

4. Уплотнение грунто-цементной смеси. Не позднее чем через 2 часа после окончания перемешивания влажной смеси начинают производить уплотнение, предварительно придав нужный профиль поверхности.

Укатку производят кулачковыми или ребристыми катками, или груженными автомашинами до тех пор, пока грунто-цементная смесь не уплотнится равномерно на заданную толщину. Уплотнение контролируется определением объемного веса в образцах, взятых с участков, подвергаемых укатке.

Показатель плотности (объемный вес) для различных грунтов может колебаться в довольно широких пределах—от 1,3 до 2,2 г/см³; для большей части грунто-цементных смесей объемный вес равен 1,6—1,8 г/см³.

Укатка—наиболее ответственная операция в цикле работ по цементации грунтов. В отличие от обработки грунтов битумными или дегтевыми материалами, когда срок окончательного уплотнения и формирования покрытия может быть растянут и зачастую покрытие достигает нужной плотности уже в период эксплуатации дороги, грунты, обработанные цементом, должны максимально быть уплотнены в сжатые сроки, исчисляемые несколькими часами. Если приготовленную смесь не уплотнить до максимальной плотности к началу схватывания и твердения цемента, то приготовленная смесь будет испорчена и даст покрытие пониженной прочности и устойчивости. Для укатки рекомендуется применять кулачковые и ребристые катки, так как они обладают способностью производить уплотнение, начиная с более нижних слоев, и постепенно переминая грунт, равномерно уплотняют его сверху.

Количество и скорость уплотняющих машин должны быть

таковы, чтобы могло быть обеспечено равномерное уплотнение обработанного участка в течение 2—3 час.

5. Устройство защитного слоя. По окончании строительных операций, перечисленных выше, обработанный цементом участок покрывают на 7 дней защитным слоем грунта толщиной в 5 см, соломой или другим каким-либо материалом, предварительно смоченным водой. Защитный слой поддерживается во влажном состоянии в течение 7 дней в целях создания благоприятных условий для гидратации и твердения цемента.

По истечении указанного срока защитный слой снимается и дорога передается в эксплуатацию.

В целях уменьшения износа покрытия и повышения его эксплуатационных качеств производится поверхностная обработка дороги битумными или дегтевыми материалами. Порядок производства работ при поверхностной обработке описан в гл. III.

На участках, где укрепление грунта производилось по методу гидрофобной цементации, поверхностную обработку битумными материалами не производят.

Описанный выше способ производства работ по цементации грунта с добавками цемента от 6 до 12% применяется в тех случаях, когда грунто-цемент проектируется к длительному использованию в качестве дорожного или аэродромного покрытия, т. е. когда к грунто-цементной смеси предъявляется требование сравнительно высокой механической прочности и устойчивости.

В тех случаях, когда необходимо бывает получить стабилизированное грунтовое основание, на которое будет укладываться прочное дорожное покрытие, или в случае использования грунто-цементного покрытия в течение короткого срока (военные дороги или аэродромы временного типа), грунты можно обрабатывать небольшими добавками цемента в количестве 2—5%.

При таких добавках цемента грунты становятся практически неразмокаемыми, почти утрачивают липкость и пластичность, но при полном их водонасыщении характеризуются меньшей несущей способностью, чем при оптимальном проценте цемента.

Здесь следует подчеркнуть, что равномерное распределение малых доз цемента в грунте, а также операции по уплотнению грунто-цементной смеси, имеют особенно большое значение. Только высокое качество работ по смешению и уплотнению смеси при оптимальной влажности

могут обеспечить стабильное состояние обработанного грунта в основании покрытий.

В последние годы в США и других странах появились специальные машины для обработки грунта цементом. Как правило, они обеспечивают проведение ряда основных операций по производству работ смешения на месте. Так, например, имеются машины, которые обеспечивают одновременное проведение операций по размельчению грунта, дозировке цемента, воды и перемешивание грунто-цементной смеси с последующим предварительным уплотнением готовой смеси.

Пользование указанными машинами обеспечивает высокое качество и большую производительность в строительных работах и почти устраняют зависимость производства работ от климатических факторов.

4. Обработка грунтов известью

Помимо обработки грунта цементом, улучшение физических и механических свойств глинистых, суглинистых и пылеватых грунтов может быть достигнуто обработкой их известью. Работами, проведенными преимущественно в лабораториях ДОРНИИ, а также и полевыми производственными опытами установлено, что в результате известкования грунты в значительной степени утрачивают способность к размоканию, не набухают, становятся мало пластичными и не липкими. Устойчивость грунтов, обработанных известью, повышается; они не снижают своей несущей способности ниже допускаемых норм даже в условиях избыточного увлажнения.

Для обработки грунта может применяться гашеная известь в виде пушонки или известкового молока, или же негашеная известь (кипелка) в виде тонко размолотого порошка.

Содержание углекислой извести (CaCO_3) в гашеной не должно быть более 3—4%; чистой же гашеной извести в пушонке не должно быть менее 70%.

Гидрат окиси кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, получаемый гашением окиси кальция (CaO) водой,—самый древний из употребляемых ныне цементов.

Процесс затвердевания извести состоит первоначально в испарении воды и кристаллизации гидрата. С течением времени известковый цемент стареет и подвергается действию углекислоты воздуха, отчего часть гидрата кальция превращается (происходит процесс карбонизации) в углекислый кальций. Другая часть гидрата взаимодействует с кремнекислыми соединениями обрабатываемого грунта, в результате чего появляются новые цементирующие вещества, делающие массу грунта более крепкой. Эти процессы нарастают с течением

времени, чем и можно объяснить увеличение прочности обработанного грунта.

Благодаря большой удельной поверхности глинистых и суглинистых грунтов при известковании, как и при цементации, помимо чисто химических реакций, происходят явления физико-химического порядка, как-то: обмен оснований, коагуляция и пр., что в свою очередь способствует дальнейшему закреплению грунта. В результате указанных явлений грунты, обработанные известью, дают после соответствующего уплотнения довольно прочную кору монолитного типа.

В отличие от обработки грунтов цементом при известковании можно успешно подвергать обработке полуболотные и сильно подзолистые, а также солонцеватые грунты. Наличие в первых грунтах поглощенного водорода, а в последних поглощенного натрия не является препятствием. Благодаря наличию физико-химического обмена происходит замена поглощенных ионов H^+ и Na^+ , в результате чего физические и механические свойства названных грунтов резко изменяются и улучшаются.

При внесении извести так же, как и при цементации должны строго соблюдаться следующие правила обработки грунтов:

1. Внесение извести в необходимом количестве и равномерное ее распределение в массе грунта.

2. Поддержание оптимальной влажности в период уплотнения смеси.

3. Уплотнение готовой смеси до установленной максимальной плотности.

Количество добавляемой извести, установление оптимальной влажности и плотности определяются по той же методике, как и при подборе грунто-цементных смесей.

Производство работ по известкованию грунтов производится в таком же порядке, как и в случае обработки их портланд-цементом. Для разрыхления, размельчения, перемешивания, розлива воды при увлажнении, укатке используются те же дорожные и сельскохозяйственные машины.

Вследствие сравнительно медленного срока схватывания извести (по сравнению с портланд-цементом) уплотнение готовой грунто-известковой смеси может производиться не в такие сжатые сроки, как при цементации грунтов. Однако и при известковании грунта достижение максимального уплотнения, по существу, решает успех производимых работ. По этой причине процессу укатки грунто-известковой смеси до максимальной плотности при оптимальной влажности уделяется самое серьезное внимание.

Как было указано выше, при обработке грунтов гаше-

ная известь может вноситься либо в виде пушонки, либо в виде известкового молока.

Россыпь пушонки желателно производить при помощи различных распределителей (специальных машин, сельскохозяйственных сеялок и пр.), однако можно рассыпать ее и вручную. После россыпи пушонки в сухом виде и равномерного ее смешивания с грунтом производят увлажнение смеси до оптимальной влажности. Уплотнение производится до заданной плотности в описанном выше порядке.

При внесении извести в виде известкового молока, последнее может распределиться по заранее подготовленному разрыхленному грунту при помощи специальных цистерн, автогудронаторов или же вручную лейками. Известковое молоко должно разливаться с таким расчетом, чтобы после его распределения и перемешивания влажность готовой смеси не превышала более чем на 3% оптимальную влажность, установленную для данной грунто-известковой смеси.

При большей влажности смеси дают подсохнуть, производя перемешивание и контролируя ее влажность.

Из этого следует, что при большой влажности грунта (в периоды дождей, весной и осенью) целесообразнее вводить известь в виде пушонки; наоборот, в сухое время года для обработки грунта желателно применять известковое молоко.

Применение извести в гашеном виде сопряжено с большими неудобствами, так как процесс гашения весьма громоздок и является большим накладным расходом, удорожающим стоимость извести, в особенности в условиях дорожного строительства. К этому следует добавить наличие отходов в комовой негашеной извести в виде недожога и пережога, достигающих иногда 40-50%, что еще больше снижает выгодность применения извести для обработки грунтов.

При известковании грунтов в дорожных целях целесообразнее применять молотую негашеную известь. Применение молотой негашеной извести, представляющей собой продукт тонкого помола негашеной извести (комовой кипелки), в основном имеет следующие преимущества.

1. Размол извести-кипелки практически обеспечивает 100%-ное использование негашеной извести и почти полностью устраняет отходы (пережог и недожог идут в дело).

2. Устраняется надобность в громоздком гасильном хозяйстве, которое является большим накладным расходом.

3. Обеспечивается получение грунто-известковых смесей более высокой прочности и облегчается дозировка и перемешивание извести с грунтом.

4. При применении молотой извести-кипелки процессы схватывания и твердения известковых растворов происходят бо-

лее быстро, особенно в присутствии тонкодисперсных веществ, каковыми и являются обрабатываемые грунты.

Производство работ с применением молотой известки-кипелки выполняется в том же порядке и с применением тех же машин, как и при обработке грунтов портланд-цементом.

Независимо от применяемых способов при известковании грунтов отпадает надобность в устройстве защитного слоя от влажного грунта или соломы, каковой устраивается при обработке грунтов цементом, ибо процессы твердения известковых гелей не требуют какого-либо специального режима влажности.

Водоустойчивость и водонепроницаемость грунто-известковых смесей могут быть повышены в случае применения гидрофобного метода известкования с введением в грунт помимо известки раствора мылонафта или другого какого-либо технического мыла. Порядок строительных работ соблюдается такой же, как и при гидрофобной цементации грунта.

Известкование грунтов хотя и вызывает изменение их физико-механических свойств, но не обеспечивает получения той высокой механической прочности, которая присуща грунтам, обработанным портланд-цементом. По этой причине грунто-известковые смеси могут быть использованы лишь в основании дорожных одежд.

ГЛАВА V

СОЛЕВАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ГРУНТОВ

1. Теоретические принципы солевой стабилизации

Степень устойчивости грунтовых покрытий и оснований обуславливается наличием внутреннего трения и связности, присущим отдельным фракциям, входящим в состав грунта. Внутреннее трение, характерное для песчаных и гравийных частиц, обеспечивает устойчивость грунта при избытке влаги или мокрой погоде. При сухой погоде расстройство грунтового покрытия предупреждается наличием связности при сущей частицам глинистых и коллоидальных размеров. Для того, чтобы эта связность не ослабевала, а наоборот, была представлена в максимальном ее выражении, необходимо присутствие влаги в грунте в количестве, не превышающем границы раскатывания этого грунта (см. рис. 2).

Грунты, даже отлично подобранные по гранулометрическим фракциям (так называемые оптимальные грунтовые смеси), не обладают прочной связностью во все времена года. В сухое время они частично деформируются и истираются вследствие нарушения сцепления между гранулометричес-

кими элементами, составляющими смесь; при сильном увлажнении благодаря частичному набуханию мелких фракций и чрезмерному увлажнению смеси могут иметь место деформации выше допускаемых величин.

В известных пределах влажности устойчивость таких смесей, как и вообще грунтов, может быть значительно повышена. Достаточно только стабилизировать оптимальную влажность, присущую данному грунту (подробно см. гл. I).

Отличительной чертой солевой стабилизации, осуществляемой обычно внесением в грунты гигроскопических солей (в виде хлористого кальция, хлористого натрия, хлористого магния и др.), является стабильное состояние «оптимальной» влажности, характерной для данного грунта.

Максимальное использование вяжущих свойств воды, значительное увеличение срока действия этих свойств, т. е. использование воды, как самого дешевого и самого доступного вяжущего материала, является основой солевой стабилизации грунта.

Так как упругость пара у растворов солей ниже, чем у чистой воды, то грунт, обработанный указанными выше солями, естественно, обладает слабой испаряющей способностью и, следовательно, может оставаться в состоянии сообщенной ему влажности довольно продолжительное время.

Ни хлористый кальций, ни хлористый натрий сами по себе не повышают механическую прочность и устойчивость обработанных грунтов, так как они не обладают вяжущими свойствами. Применяемые в настоящее время гигроскопические соли лишь косвенным путем, за счет поддержания оптимальной влажности, обеспечивают наиболее благоприятные условия для максимального уплотнения грунта, что и приводит к уменьшению износа покрытий и увеличению сопротивляемости образованию деформаций.

Внося в грунт хлористые соли кальция или натрия и увлажняя его до оптимальной влажности, можно обеспечить наиболее благоприятные условия для максимального уплотнения смеси в течение продолжительного времени, т. е. появляется возможность уплотнять дорогу движением транспорта. Обеспечив максимальное уплотнение грунтовой поверхности, мы тем самым уменьшаем ее износ, увеличиваем устойчивость во влажный период за счет малого проникновения влаги в обработанный слой. С другой стороны, согласно имеющимся исследованиям (Гогентоглер, Шаров и др.) гидратационная способность грунтовых частиц, а следовательно, их набухаемость и размокание могут быть заметно снижены действием раствора солей. Такое снижение влечет

за собой значительное уменьшение усадки при высыхании грунта, что устраняет образование трещин в покрытии в сухое время года; образование пыли почти устраняется. Это свойство также является немаловажным фактором в комплексе других свойств, обеспечивающих повышение устойчивости и сопротивления износу покрытий, стабилизированных гигроскопическими солями.

Способность хлористого кальция и других гигроскопических солей задерживать испарение влаги из обработанного грунта имеет большое значение. Не менее важную роль играет свойство гигроскопичности этих солей, т. е. способность непрерывного поглощения влаги из атмосферы, что и обеспечивает поддержание влажности в обработанном грунте на определенном уровне.

Достаточно указать, что хлористый кальций при средних условиях погоды поглощает влагу в количестве, превышающем его вес в 4—5 раз. Другим интересным фактом является разница в поглощении влаги в течение дня и ночи. Ночью хлористый кальций поглощает влагу в количестве, превышающем его собственный вес в 4—10 раз (что объясняется увеличением относительной влажности воздуха). В жаркое время дня он сохраняет влагу от $\frac{1}{2}$ до $\frac{2}{3}$ этого количества. Таким образом, действие хлористого кальция может быть сравнено с выпадением в течение каждой ночи небольшого дождя. Если учесть, что привлечение влаги из воздуха—процесс постоянный и непрерывный, то большое практическое значение этого свойства становится очевидным.

В случае вымывания соли грунт постепенно может возвратиться в свое природное состояние. Таким образом, данный вид стабилизации грунта, не изменяя коренным образом свойств обрабатываемого грунта, способен обеспечить надлежащие технические его свойства за счет периодического внесения добавок гигроскопических солей. Необходимость в периодических повторных добавках является характерной особенностью солевой стабилизации грунтов. Как показывает накопленный опыт, своевременное пополнение вымытой соли и правильный уход за дорогой ведут к постепенному нарастанию связности в грунте и стабилизации в нем полезной влажности.

Немалую роль в разбираемом виде стабилизации играют физико-химические процессы, происходящие при внесении в грунты тех или иных солей.

Как указано было в гл. I, наиболее деятельной частью грунта являются его глинисто-коллоидальные фракции. В присутствии раствора хлористого кальция или хлористого натрия в грунте безусловно имеет место физико-химический об-

мен оснований, заканчивающийся вхождением в поглощающий шомплекс катионов Ca^{++} или Na^{+} .

При обработке грунтов хлористым кальцием мы будем в конечном итоге иметь в поглощенном состоянии катион Ca^{++} , что будет способствовать коагуляции глинисто-коллоидальных фракций и образованию из них микроагрегатов. В результате этих процессов гидрофильные свойства тонких фракций намного снизятся, если до этого грунт был насыщен одновалентными ионами.

Отсюда можно сделать вывод, что при обработке грунтов с избыточным содержанием глинистых частиц—применение хлористого кальция будет особенно целесообразно, ибо при этом будет уменьшаться дисперсность грунта и частично понижаться вяжущие свойства глины.

В случае обработки грунтов хлористым натрием в результате вымывания избытка NaCl из грунтового раствора, в поглощенном состоянии окажется катион Na^{+} , являющийся сильно гидратированным ионом.

Нахождение Na^{+} в поглощенном состоянии приведет к значительному увеличению дисперсности глинистых и коллоидальных фракций, имеющих в грунте, к сильному распылению микроагрегатов и к увеличению гидрофильных свойств грунта, что выразится особенно ярко в увеличении набухания тонкодисперсных частиц. Так, например, тяжелый суглинок, насыщенный Ca^{++} при замешивании его с водой, дает увеличение объема примерно в два раза; тот же суглинок, насыщенный Na^{+} , при тех же условиях опыта дает увеличение объема в воде примерно в 7—8 раз.

В результате большой набухаемости и закупорки грунтовых пор гидратными оболочками, грунты, содержащие поглощенный натрий, становятся практически водонепроницаемыми. В природных условиях такие грунты известны под именем солонцов и солонцеватых почв.

На указанной важной особенности натрий-грунтов (солонцов) основан метод солонцевания грунтов, разработанный академиком Соколовским (для водонепроницаемых прослойков).

Таким образом, применяя для обработки хлористый натрий, следует учитывать в дальнейшем возрастание вяжущих свойств глинистых частиц и способность их к сильному набуханию и отсутствию фильтрации.

Такие особенности хлористого натрия указывают на целесообразность применения NaCl в условиях недостаточного содержания глинистых фракций в обрабатываемом грунте.

Суммируя вышеизложенное, следует подчеркнуть, что про-

цессы, происходящие при солевой стабилизации, носят характер динамического равновесия.

В первый период свойства обработанного грунта обуславливаются факторами, связанными с наличием оптимальной влажности в смеси. В процессе постепенного вымывания свободных солей начинают проявляться свойства поглощенных катионов (Ca^{++} или Na^{+}).

В свете изложенных выше теоретических представлений солевая стабилизация имеет более широкое значение и ограничивать ее областью борьбы с пылью на дорогах, как это делалось еще недавно, безусловно нельзя.

Как показывает огромный производственный опыт США и других стран наибольший эффект в солевой стабилизации достигается при обработке грунтов «оптимального» гранулометрического состава (табл. 8).

2. Порядок постройки дорог, стабилизируемых солями

Для приготовления и укладки стабилизированных смесей пользуются различными методами, из которых наиболее распространенным является метод смешения на дороге.

Смешение на месте. В начале производят разрыхление грунта на дороге, подвозят необходимое количество гранулометрических добавок, требуемое для получения смеси с назначенным числом пластичности и перемешивают грейдерами или ментенерами.

Подготовив смесь, производят россыпь хлористого кальция или хлористого натрия в количестве 0,50–0,75 кг/м². После россыпи смесь снова тщательно перемешивается до полной однородности и уплотняется. В случае, если влажность смеси будет ниже оптимальной влажности, установленной лабораторным путем — предварительно производят поливку.

В случае внесения соли на дорогу в виде раствора производят розлив, исходя как из потребного количества соли на 1 м², так из наличия влажности в обрабатываемом грунте. Перемешивание и укатку производят теми же машинами.

Смешение материалов в установках. Смешение вносимых гранулометрических добавок с грунтом, а также и с гигроскопическими солями можно также производить в специальных смесительных установках стационарного типа, а также и в передвижных смесителях, перемещающихся вдоль строящейся дороги. Смешение в установке имеет следующие преимущества по сравнению со смешением на дороге:

1) обеспечивает получение более однородной смеси, чем при смешивании материалов (гранулометрических добавок и соли) на дороге;

2) неблагоприятные условия погоды влияют значительно меньше, чем при смешении на дороге; для перемешивания смеси в установке требуется меньший расход воды на увлажнение;

3) влечет меньшие по времени перерывы в движении по дороге;

4) создает меньшую потребность в работе дорожных машин на дороге;

5) облегчает лабораторный контроль за составом смеси и повышает точность в дозировках отдельных компонентов смеси.

В США и других странах имеется несколько типов конструкций установок для смешения, подвижных и стационарных, работа таких установок заключается главным образом в размельчении грунтового вяжущего (глинистых добавок), подаче в лопастную мешалку соответствующего количества отсортированного крупного минерального материала, грунтового вяжущего, гигроскопической соли и воды. В результате перемешивания указанных материалов из мешалки поступает готовая однородная смесь, которая грузится на автомашины и доставляется к месту работ или (при подвижной установке) равномерно распределяется по поверхности дороги. При смешении этим способом требуется предварительное (хотя бы частичное) размельчение грунтового вяжущего на дороге.

Гигроскопические соли вносятся в грунтовые смеси из расчета $0,3-0,5 \text{ кг/см}^2$ на каждые 5 см толщины слоя готовой смеси в плотном теле. Общее количество добавок соли не должно превышать $0,8-1 \text{ кг/м}^2$ с тем, чтобы максимальная толщина обрабатываемого слоя не превышала 10 см. При обработке слоя толщиной больше 10 см вносимая добавка соли смешивается только с верхним слоем в пределах глубины до 10 см.

При солевой стабилизации формирование уложенного покрытия в плотную кору происходит постепенно и длится, в зависимости от интенсивности движения, от 2 до 4 недель. Укатку готовой смеси всегда стремятся производить сразу же после ее распределения на дороге, используя для этой цели кулачковые и ребристые катки или катки с резиновыми колесами. Однако окончательное уплотнение покрытия достигается только в процессе эксплуатации дороги под влиянием проезда, который необходимо регулировать по всей ширине проезжей части.

В первые недели эксплуатации дороги, когда покрытие еще окончательно не сформировалось, производят периодическую утюжку и профилировку дороги, исправляя при этом дефектные места. Там, где обнаружен избыток грунтового вяжущего (что сказывается на сильном размягчении дороги в дождь), добавляется необходимое количество скелетных добавок; там, где смесь тощая, малосвязная, добавляется грунтовое вяжущее. В этот период формирования покрытия по всей ширине проезжей части производят дополнительную поверхностную россыпь соли из расчета 0,2—0,3 кг/м².

Для обеспечения хорошего стока поверхностной воды на дорогах с описываемыми покрытиями рекомендуется поддерживать поперечный уклон не менее 3%.

Качество стабилизированных дорог при тщательном уходе в период эксплуатации продолжает улучшаться в течение несколько месяцев, после постройки. Большая часть рыхлого материала, отделившегося в начале укатки верхнего слоя, снова смешивается с материалом покрытия под влиянием движения, и в результате получается плотное, твердое, свободное от пыли покрытие, которое при нормальных условиях долго остается в таком состоянии.

Дороги, стабилизированные гигроскопическими солями, после того, как они достигнут необходимой плотности, могут служить очень хорошим основанием для покрытий высшего типа.

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие	3
Введение	5
 Глава I. Основные принципы стабилизации грунтов	
1. Краткие сведения о грунтах как дисперсных системах	7
2. Поглощительная способность грунтов и ее влияние на их стро- ительные свойства	10
3. Отношение грунта к воде и водным растворам	14
4. Стабилизация грунтов	19
 Глава II. Грунтовые смеси оптимального гранулометрического состава	 23
 Глава III. Обработка грунтов органическими вяжущими материалами	
1. Физико-химические процессы при обработке грунтов органи- ческими вяжущими материалами	36
2. Специфика свойств грунтов при стабилизации их органиче- скими вяжущими материалами	45
3. Органические вяжущие материалы	48
4. Свойства стабилизированных грунтов	54
5. Некоторые вопросы организации и производства работ при обработке грунтов органическими вяжущими материалами	62
 Глава IV. Обработка грунтов неорганическими вяжущими материалами	
1. Физико-химические взаимодействия грунта и цемента	68
2. Подбор и испытание грунто-цементных смесей	70
3. Основные правила производства работ по цементации грунтов	76
4. Обработка грунтов известью	80
 Глава V. Солевая стабилизация грунтов	
1. Теоретические принципы солевой стабилизации	83
2. Порядок постройки дорог, стабилизируемых солями	87

ОПЕЧАТКИ

К брошюре В. М. Безрук и А. И. Лысихиной
„Основы стабилизации грунтов в дорожном строительстве“.

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать	По чьей вине
27	21 сверху	М. И. Филатов	М. М. Филатов	редактора
50	табл. 12 6—7 сверху	25—240	25—40	редактора
58	табл. 14 прим. 1	25—70 см ⁸	25—75 см ⁸	редактора

Цена 6 руб.

2 10