

# О ТЕОРИИ И ПРАКТИКЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Глинистые грунты наиболее распространены на территории России и являются неблагоприятными для дорожного строительства. Основным сдерживающим фактором их использования при строительстве и обеспечении надежной несущей способности дорожных одежд является резкое снижение физико-механических характеристик при увлажнении. Поэтому применение в строительстве данных грунтов возможно только лишь при их стабилизации и укреплении.

Постоянная высокая несущая способность грунта может быть обеспечена двояким путем: либо защитой от разрушения высокопрочных конденсационных и кристаллизационных структур грунта, либо путем их искусственного создания. Мероприятия по улучшению механических качеств грунтов, в связи с этим, разделяются на два направления.

**1. Стабилизация** несущей способности прочных от природы грунтов путем предохранения существующих связей между частицами и агрегатами, главным образом от разрушения при действии влаги. Поскольку взаимодействие воды с минеральными частицами происходит на поверхности последних, стабилизация грунта (в смысле придания водоустойчивости его природным внутренним связям) может быть достигнута, в первую очередь, путем изменения свойств этой поверхности и придания ей способности отталкивать воду;

**2. Укрепление** грунтов путем создания новых прочных и водостойких связей между частицами и агрегатами. Созда-

ние новых связей приводит, в конечном счете, к образованию новой структуры или усилению ранее существующей структуры грунта. Следовательно, процесс укрепления является процессом структурообразования, а новые связи создаются путем воздействия на грунт структурообразующих веществ.

Ниже рассмотрено улучшение качеств грунта ионными (водный раствор органических кислот с содержанием элементов кальция, магния, калия, натрия и др.) и полимерными стабилизаторами (водный раствор полимеров с наличием в их структуре гидрофильных групп). Для того чтобы иметь представление о механизме стабилизации глинистых грунтов стабилизаторами, следует рассмотреть особенности грунтов как дисперсной системы.

Грунты, в особенности глинистые, обогашены веществами, находящимися в коллоидальном состоянии. Присутствие коллоидов в грунтах делает их далеко не безразличными ко многим физическим и химическим факторам. К коллоидам, которые играют главную

роль в грунтах, относятся гидраты окиси железа, гидроокиси алюминия, коллоиды кремнекислоты и гумус.

**Кремнекислота  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$**  в коллоидном состоянии может находиться во многих грунтах. Кремнекислота является гидрофильным коллоидом и относится к ненабухающим гелям. В большинстве грунтов кремнекислые коллоиды несут на себе отрицательный заряд. **Гидрат окиси железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$** , придающий глинистым грунтам бурый и красноватый цвет, характеризуется значительными цементирующими свойствами. Характерным свойством коллоидов гидрата окиси железа является способность нести на себе различные заряды (перезаряжаться). Так, в кислой среде коллоиды заряжаются положительно, и наоборот, в щелочной среде – отрицательно.

**Гидрат окиси алюминия  $\text{Al}(\text{OH})_3$** , а точнее, его коллоиды во многом схожи с коллоидными соединениями железа, в частности они могут перезаряжаться в зависимости от условий среды. **Гумусовые** коллоиды заряжены отрицательно, характеризуются высокой гидрофильностью и низкой цементирующей способностью.

Вышеперечисленные коллоиды и другие высокодисперсные (глинистые) частицы, в основном, определяют поглощающий комплекс грунтов: цеолитный и гуматный (гумус), обладающий, вследствие своей высокой раздробленности, большой энергией поверхности – поглощающей способностью. В зависимости от способов поглощения при укреплении и стабилизации выделено четыре вида поглотительной способности грунтов:

- **механический вид поглотительной способности** – задерживание порами грунта взмученных частиц в процессе фильтрации;
- **физический вид поглотительной способности** осуществляется при содействии главным образом двух факторов: свертывания коллоидов под воздей-



Рис. 1. Грунтовые агрегаты после измельчения супеси и суглинки при оптимальной влажности

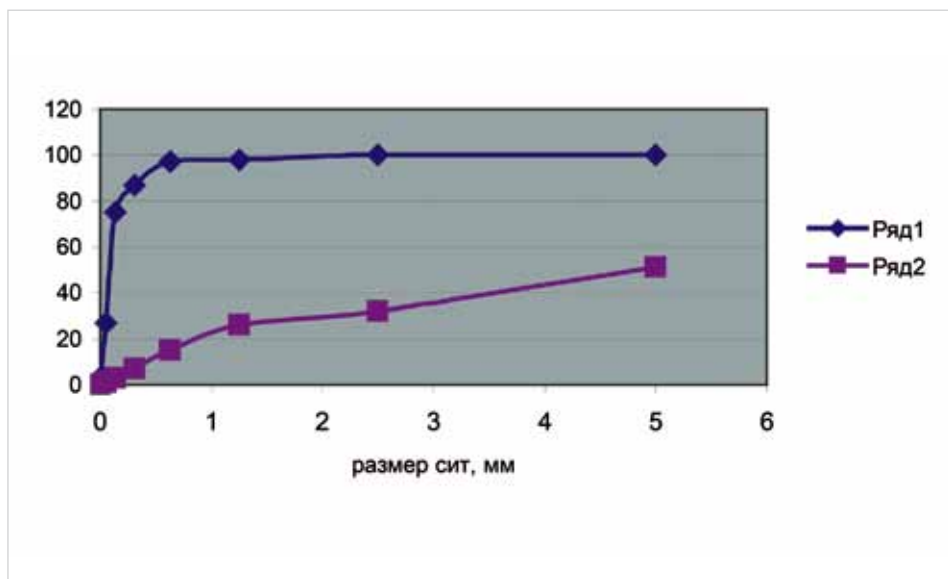


Рис. 2. Зерновой (ряд 1) и агрегатный (ряд 2) составы (содержание фракций, %, мельче данного размера) суглинка, подготовленного (измельченного) в лабораторных условиях к стабилизации

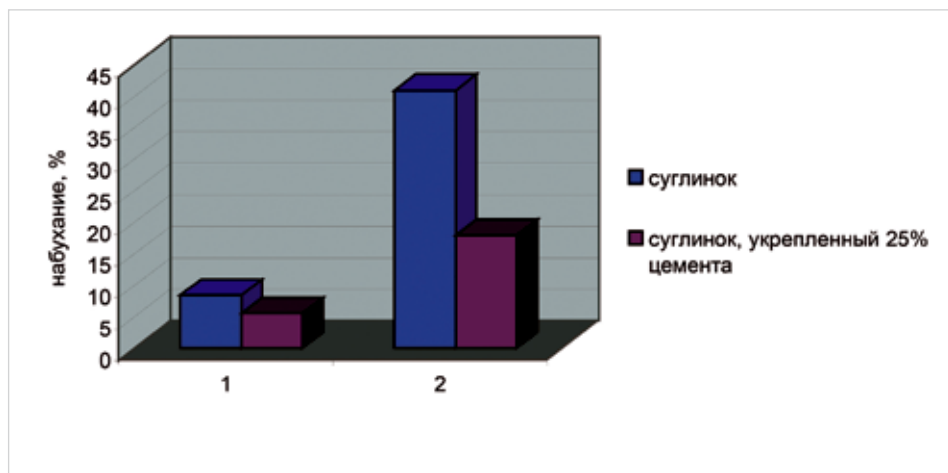


Рис. 3. Набухание грунтовых агрегатов при: 1 – капиллярном водонасыщении, 2 – полном водонасыщении

ствием электролитов (в том числе вводимых для стабилизации грунтов) или взаимного свертывания коллоидов с образованием грунтовых агрегатов;

■ **физико-химический вид поглотительной способности** обусловлен способностью грунтов обменивать свои ионы (обменные ионы диффузного слоя коллоидных и глинистых частиц) на ионы приходящих в соприкосновение с ними растворов;

■ **химический вид поглотительной способности** имеет место при взаимодействии грунта и приходящих в соприкосновение с ним растворов и суспензий с образованием нерастворимых (главным образом водонерастворимых) соединений.

Следует отметить, что механический, физический и физико-химический виды

поглотительной способности имеют обратимый характер и при определенных условиях (водонасыщение, введение растворов солей и т. п., а также механическое воздействие) грунты могут возвращаться в первоначальное состояние. Поглотительная способность глинистых грунтов обуславливает образование и сохранение грунтовых агрегатов. Наличие в грунтах коллоидов, имеющих различные заряды, приводит к взаимному их слипанию с образованием грунтовых агрегатов. Присутствие в поровом пространстве грунтов растворов солей, оснований или кислот обуславливает перезарядку, как отмечалось выше, некоторых коллоидов и повышает вероятность образования агрегатов.

Такие агрегаты называют первичными, их наличие в глинистых грунтах явля-

ется закономерным. Размеры и прочность первичных агрегатов зависят от типов грунтов и условий их образования (рис. 1). По прочности грунтовые агрегаты (прочность агрегатов в неводонасыщенном состоянии составляет от 0,02 до 10 МПа) делят на условно (относительно) прочные размером менее 2 мм, малопрочные – 2–5 мм и непрочные – крупнее 5 мм. СНиП 3.06.03-85 «Автомобильные дороги» разрешает в размельченном глинистом грунте содержание слабых агрегатов (частиц размером более 5 мм) до 25%.

Размельчить глинистый грунт до минимальных размеров агрегатов (менее 2 мм) можно в сухом состоянии, однако это требует значительных затрат и не всегда возможно в реальных условиях. Для достижения требуемого агрегатного состава глинистого грунта современными механизмами рекомендована влажность размельчаемого грунта в пределах 0,2–0,4 от влажности на границе текучести. При любом способе измельчения агрегатный состав глинистого грунта, подготовленного к стабилизации, в значительной степени отличается от зернового (рис. 2), так как более 80% частиц грунта объединены в агрегаты.

Таким образом, глинистые грунты, подлежащие стабилизации, представляют собой дисперсную систему в агрегатном состоянии. Как и глинистому грунту в целом, агрегатам присущи такие свойства, как водонасыщение и набухание (рис. 3), с вытекающими из этого последствиями. Так, внутреннее сцепление (С) глинистых грунтов (агрегатов) при водонасыщении (при переходе из твердого в текучее состояние) снижается в 10 и более раз, обуславливая падение прочности при сжатии ( $R_{сж}$ ), находящееся в прямой зависимости от С:  $R_{сж} = 2С + (tg \phi/2 + \Pi/4)$ .

Введение стабилизатора, как электролита с определенным показателем рН, в глинистые грунты (стабилизаторы вводят в водном растворе) вызывает, как отмечалось выше, агрегацию частиц грунта с образованием вторичных агрегатов. Кроме того, происходит ионный обмен с переходом в раствор с диффузного слоя частиц и поверхности агрегатов обменных ионов вместе с адсорбированной водой, в результате



чего повышается плотность коагулируемых частиц и грунта в целом.

При использовании полимерных стабилизаторов обменные реакции происходят между ионами функциональных групп полимера и обменными ионами диффузной части коллоидных и глинистых частиц. Реакции при этом идут по следующей схеме:  $2R - CO - NH_3^+ + (\text{грунт}) Ca^{++} = (R - CO - NH_2)_2Ca^{++} + (\text{грунт}) H_2^+$ . Необходимо отметить, что добавка стабилизатора (в том числе полимерного) составляет 0,01–0,5% от массы грунта, в связи с чем роль новообразований при химическом виде поглотительной способности, выпадающих в осадок, а также конденсационной структуры, образованной полимером в грунте, при пористости последнего 20–40%, ничтожна и ниже не рассматривается.

При любых видах поглотительной способности, имеющих место при введении водного раствора стабилизатора в пределах оптимальной влажности, первичные грун-

товые агрегаты в незначительной степени подвергаются изменениям (лишь на поверхности), сохраняя основные свойства исходного грунта. Повышение же плотности и, как следствие, снижение капиллярного водонасыщения глинистых грунтов обуславливает эффект использования стабилизаторов (рис. 4) при оптимуме добавки. При этом чем выше содержание глинистых частиц, тем значительней эффект использования стабилизаторов.

Более высокие требования производителей стабилизаторов к плотности стабилизированных грунтов, достигнутой для лабораторных образцов методом Проктора модифицированного, усиливают эффект введения добавок. Необходимо напомнить, что метод Проктора модифицированного в сравнении со стандартным методом лабораторного определения максимальной плотности грунтов по ГОСТ 22733-2002 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности» обеспечивает более высокую плотность материала.

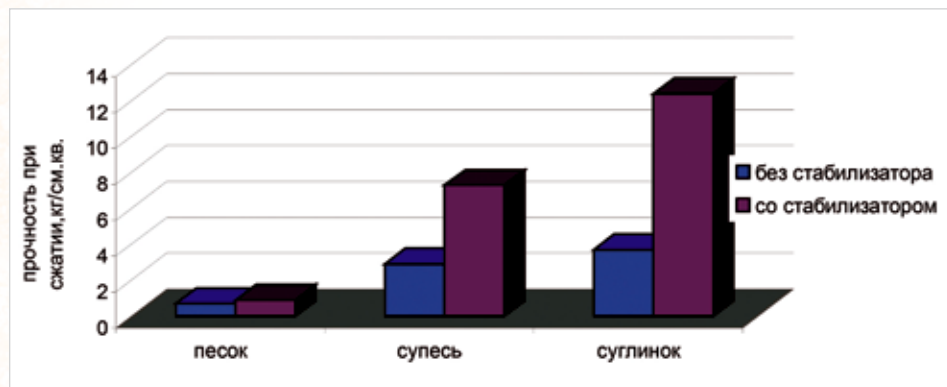


Рис. 4. Зависимость прочности грунтов после капиллярного водонасыщения от наличия в них добавки стабилизатора RRP



Фото 1. Слой стабилизированного грунта

Физический, физико-химический и химический виды поглотительной способности грунта могут быть усилены в процессе технологических операций приготовления стабилизированных грунтов. Так, при перемешивании глинистых минералов с раствором стабилизатора и уплотнении смеси, между глинистыми частицами могут возникать ионно-электростатические связи, обусловленные наличием в кислой среде разноименных потенциалов на боковых сколах и базальных поверхностях глинистых частиц.

В.И. Осиповым установлено, что отрицательный заряд у глинистых минералов всегда сохраняется на базальных поверхностях, а на сколах, которые являются наиболее энергетически активными местами, знак заряда меняется в зависимости от pH взаимодействующего с ними раствора. При pH менее 7 он становится положительным, и тогда на сколах в двойном электрическом слое должны находиться анионы; при pH более 7 скол заряжается отрицательно, а вокруг глинистого минерала адсорбируются только катионы. Изменение заряда частиц и агрегатов по сколам усиливает не только поглотительную способность грунта, но также образование вторичных агрегатов.

Эффект поглотительной способности глинистых грунтов с точки зрения повышения их водостойкости и других показателей может быть получен только при правильном выборе стабилизатора для конкретного типа грунта. Так, для суглинка с емкостью обмена 11,1 мг/экв на 100 г грунта при содержании обменных катионов:  $Ca_2^+ = 7,2$ ;  $Mg_2^+ = 3,4$ ;  $Na^+ = 0,21$ ;  $K^+ = 0,29$  мг/экв важно, чтобы в составе стабилизатора были катионы, способные заместить катионы натрия и калия, обеспечив грунт меньшую величину набухания.

Однако без создания дополнительной структуры в стабилизируемом грунте, в том числе внутри агрегатов (даже при правильном выборе стабилизатора), обеспечить требуемые водо- и морозостойкость материала для большинства дорожно-климатических зон и конструктивных слоев дорожных одежд (где имеет место полное водонасыщение грунта) невозможно. Как правило,



Фото 2. Слой износа из щебня на стабилизированном грунте

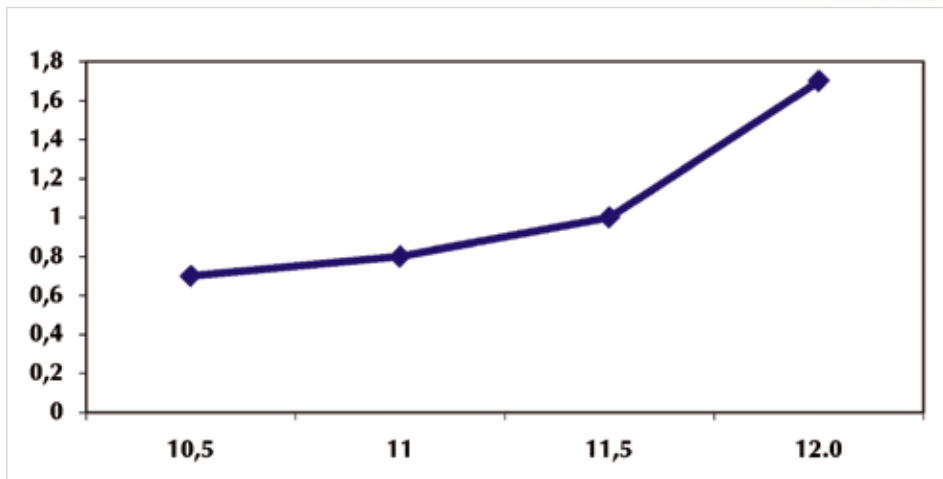


Рис. 5. Зависимость прочности укрепленного грунта (МПа) от pH среды (по данным Г.И. Банника)

| Состав смеси, %  | 7 суток твердения без водонасыщения             | 28 суток твердения после капиллярного водонасыщения |   |                             |
|--|---|---|---|-----------------------------|
|  | Предел прочности при сжатии, кг/см <sup>2</sup> | Предел прочности при сжатии, кг/см <sup>2</sup>     | Предел прочности при сжатии, после 10 циклов замораживания-оттаивания, кг/см <sup>2</sup> | Коэффициент морозостойкости |
| Мергель – 100, цемент – 2, вода – 8                    | 34,37   | 41,3  | 19,47   | 0,46                        |
| Мергель – 100, цемент – 2, вода – 8, «Дорзин» – 0,001  | 42,96   | 49,15   | 33,47   | 0,68                        |
| Мергель – 100, цемент – 4, вода – 8                    | 40,62   | 42,75   | 20,0  | 0,47                        |
| Мергель – 100, цемент – 4, вода – 8, «Дорзин» – 0,001  | 45,87   | 47,80   | 47,8  | 0,82                        |
| Мергель – 100, цемент – 4, вода – 8, «Дорзин» – 0,004  | 36,37   | 34,62   | 17,12   | 0,49                        |
| Мергель – 100, цемент – 6, вода – 8                    | 57,5  | 66,50   | 37,37   | 0,56                        |
| Мергель – 100, цемент – 6, вода – 8, «Дорзин» – 0,002  | 56,75   | 56,82   | 43,25   | 0,76                        |
| Мергель – 100, цемент – 6, вода – 8 «Дорзин» – 0,004   | 54,75   | 47,25   | 31,3  | 0,66                        |
| Мергель – 100, цемент – 8, вода – 8                    | 57,62   | 50,75   | 47,20   | 0,93                        |
| Мергель – 100, цемент – 8, вода – 8, «Дорзин» – 0,002  | 62,12   | 56,5  | 58,12   | 1,03                        |
| Мергель – 100, цемент – 10, вода – 8, «Дорзин» – 0,004 | 68,25   | 46,0  | 32,87   | 0,71                        |

Табл. 1.



Фото 3–4. Способы внесения в грунт раствора стабилизатора





Фото 5. Перемешивание смеси грунта с цементом и стабилизатором



Фото 6. Перемешивание смеси грунта со стабилизатором

при полном водонасыщении грунтовые агрегаты набухают и разрушают стабилизированный грунт.

Таким образом, стабилизаторы глинистых грунтов, повышая их физико-механические показатели, не способны в полной мере решить все проблемы стабилизации и укрепления. Для повышения эффективности использования стабилизаторов автором статьи разработаны технологические приемы приготовления и укладки стабилизированных грунтов, а также проект изменений требований существующих

стандартов к таким материалам, часть из которых изложена в ранее опубликованных статьях.

Область использования стабилизированных грунтов, определенная соответствующими техническими условиями и стандартами организаций, обусловлена их низкими показателями прочности при полном водонасыщении и морозостойкостью. Грунты, обработанные только стабилизаторами, применяют для устройства рабочего слоя земляного полотна, нижних слоев несущего основания и дополнитель-

ных слоев оснований, а также покрытий (на дорогах низших категорий с устройством слоя износа) во 2–5-й дорожно-климатических зонах, 1–2 типах местности по характеру и степени увлажнения при защите слоев от увлажнения. В ряде случаев стабилизаторы (в основном полимерные) способны переводить глинистые грунты в группу непучинистых или слабопучинистых, расширяя диапазон их использования (фото 1–2).

Простота технологии стабилизации глинистых грунтов с использованием различной дорожной и сельскохозяйственной техники (фото 3–6), а также незначительный расход добавки обуславливают эффективность применения стабилизаторов. Для расширения области использования стабилизированных грунтов, в частности для несущих слоев оснований, применяют комплексный метод укрепления, когда совместно со стабилизаторами используют неорганические вяжущие материалы. В качестве примера приведены физико-механические показатели мергеля (район Сочи), укрепленного цементом совместно со стабилизатором «Дорзин» (табл. 1).

Как видно из приведенных данных, добавка стабилизатора (при определенном расходе) способствует повышению водо- и морозостойкости укрепленных грунтов. Расход стабилизатора определяют в зависимости от типа грунта и состава стабилизатора, при этом важно, чтобы рН водной вытяжки среды (укрепленного грунта) был более 10. На рис. 5 приведена зависимость прочности укрепленных грунтов от рН водной вытяжки среды. С увеличением щелочности раствора растет прочность материала, это обстоятельство следует учитывать при комплексном укреплении грунтов.

Технология комплексного укрепления грунтов с использованием стабилизаторов отличается от технологии стабилизации лишь в дополнительной операции внесения минерального вяжущего с последующим перемешиванием смеси (фото 5, 6).

**С.Г. Фурсов,**  
канд. техн. наук,  
заведующий лабораторией  
укрепления грунтов  
ЗАО «СоюзДорНИИ»