

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.212.5

Р. М. ХУДАЙКУЛОВ, доктор философии по техническим наукам, Т. Л. МИРЗАЕВ, старший преподаватель, Ташкентский институт по проектированию, строительству и эксплуатации автомобильных дорог, Узбекистан

**УКРЕПЛЕНИЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦЕМЕНТА**

Повышению темпов строительства и реконструкции автомобильных дорог способствует применение грунтов, укрепленных цементом. В последние годы они всё чаще используются для устройства основания дорожных одежд. Однако в области проектирования и строительства дорожных одежд с конструктивными слоями из цементогрунтов многие положения требуют проверки и уточнения. Уделено внимание комплексному укреплению грунтов одновременно цементами и органическими вяжущими (битумами). Применение последних повышает водоустойчивость и прочность грунтовых агрегатов. Произведены исследования для выявления расчетных показателей искусственных засоленных грунтов, укрепленных цементом, стабилизированных битумной эмульсией в лабораторных и полевых условиях. Рассмотрены улучшения, прочностные и деформационные характеристики лёссовых грунтов, используемых при строительстве земляного полотна дорожных одежд с комплексным укреплением.

В настоящее время при быстром темпе развития автомобильного транспорта и внешней торговли роль дорожного строительства возрастает с каждым годом, что обуславливает необходимость строительства прочных долговечных и отвечающих нормативным требованиям автомобильных дорог, для создания которых необходим всесторонний учет различных факторов при проектировании и строительстве. Это климатические и грунтовые условия местности, возможность использования природных ресурсов в районе проложения автомобильной дороги, необходимость обеспечения показателей автомобильной дороги с учетом перспектив движения, сохранения окружающей среды и т. д. Выполнение указанных требований весьма важно по той причине, что при строительстве автомобильных дорог используются в большом объеме различные каменные материалы (щебень, гравий), расход которых в плотном теле часто составляет 3,0–3,5 тыс. м³, а на дорогах I–II категории – 6,5–7,5 тыс. м³ на 1 км дороги. В районах строительства, где нет каменных материалов, возникает необходимость в перевозках щебня, гравия, песка за сотни километров автомобильным транспортом, что удорожает их первичную стоимость в 3–4 раза и более [1].

Указанное обстоятельство является главной причиной значительного удорожания дорожного строительства и замедления темпов производства работ, к тому же разработка карьеров приводит к нарушению экологического равновесия окружающей среды. Как показали результаты многолетних исследований дорожных институтов, а также практический опыт проектирования и строительства, денежные и материальные затраты могут быть значительно снижены, если для устройства дорожных одежд вместо каменных материалов применять местные грунты.

Прочное и стабильное во времени основание и земляное полотно являются важнейшими факторами надежности автомобильных дорог. Однако значительное увеличение земляных работ или отсутствие грунтов, пригодных для их возведения методов и методик искусственного целенаправленного преобразования свойств, в первую очередь местных глинистых грунтов различного возраста и генезиса, таких как супеси, суглинки и глины, требуют разработки методов улучшения свойств лёссовых грунтов.

В настоящее время хорошо разработаны и широко применяются многочисленные методы искусственного

улучшения свойств местных грунтов. В результате применения укрепленных грунтов создается реальная возможность ежегодного высвобождения сотен железнодорожных составов и многих тысяч автомобилей от перевозок каменного материала. Один из видов улучшений состава грунта – его укрепление с применением цемента. Однако в области проектирования и строительства дорожных одежд с конструктивными слоями из цементогрунтов многие положения требуют проверки и уточнения.

Физико-механические свойства цементогрунтов изменяются в широких пределах в зависимости от свойств укрепляемых грунтов, их генезиса и состава. Требования к цементогрунтам, используемым в дорожной одежде, зависят от состава подвижной нагрузки, ее интенсивности и от климатических режимов регионального характера: увлажнения и высушивания, замораживания и оттаивания дорожной одежды. Монолитность цементогрунта обеспечивается в результате сложных физических, физико-химических и химических процессов взаимодействия между его компонентами (грунта, цемента и воды), содержание которых устанавливается лабораторными испытаниями с учетом разнообразных свойств применяемых грунтов и цемента [2]. Следует отметить, что физико-механические свойства цементогрунтов зависят от свойств каждого компонента в отдельности, соотношения между ними, а также от технологии производства работ по изготовлению цементогрунтовой смеси и укладке ее в дорожную одежду. Требования к цементогрунту определяются условиями его работы в различных слоях дорожной одежды в процессе ее эксплуатации.

Грунты являются наибольшей по объему и весу составной частью цементогрунта. Поэтому процесс приготовления нового материала путем введения в естественные грунты вяжущих материалов (в данном случае цемента) обычно называют укреплением грунтов. Соответственно, термин «цементогрунт» иногда заменяют выражением «грунт, укрепленный цементом». Использование цементогрунтов для устройства дорожных одежд известно давно. Есть сведения о попытках использовать песчано-глинистую смесь, укрепленную 12 % цемента для устройства покрытия на садовых дорожках еще в 1912 г. [3].

Ряд работ теоретического и производственного направления опубликован докторами технических наук,

На рисунках 1 и 2 показаны кривые, характеризующие изменения прочности суглинистого цементогрунта в зависимости от количества солей NaCl, CaCl₂, CaSO₄ и Na₂SO₄ с разными дозировками цемента. В большинстве случаев наличие небольшого (до 1–3 %, а в некоторых случаях и до 5 %) содержания этих солей в грунте способствует повышению прочности цементогрунта, а увеличение их количества сверх этого предела вызывает постепенное снижение прочности.

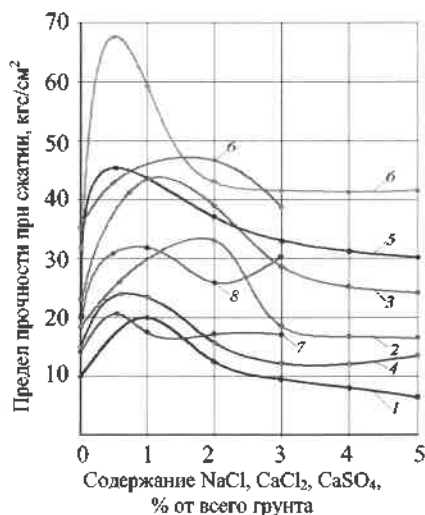


Рисунок 1 – Влияние содержания солей NaCl, CaCl₂, CaSO₄ на пределы прочности при сжатии суглинистого цементогрунта:
 1 – грунт + NaCl + 6 % цемента; 2 – грунт + NaCl + 10 % цемента;
 3 – грунт + NaCl + 14 % цемента; 4 – грунт + CaCl₂ + 6 % цемента;
 5 – грунт + CaCl₂ + 10 % цемента; 6 – грунт + CaCl₂ + 14 % цемента;
 7 – грунт + CaSO₄ + 6 % цемента; 8 – грунт + CaSO₄ + 10 % цемента;
 9 – грунт + CaSO₄ + 14 % цемента

Данные рисунка 1 показывают, что наличие в суглинистом цементогрунте небольших количеств (0,5–2 %) хлоридов натрия и кальция NaCl, CaCl₂, а также сульфата кальция CaSO₄ приводит к повышению его прочности, особенно с большими (10–14 %) дозировками цемента. Наиболее благоприятно влияет добавка хлорида кальция CaCl₂. При содержании в смеси 10–14 % цемента малые добавки CaCl₂ повышают пределы прочности цементогрунта примерно в 2 раза. Увеличение количества CaCl₂ до 5 % снижает в некоторой степени прочность цементогрунта. Однако даже при 5%-ном содержании CaCl₂ в цементогрунте прочность его с 10–14 % цемента всё же выше, чем прочность цементогрунта с теми же дозировками цемента, но без CaCl₂. Хлорид натрия повышает прочность суглинистого цементогрунта при наличии его в грунте от 0,5 до 3 %.

Более сложный характер имеет зависимость между пределом прочности суглинистого цементогрунта и содержанием соли Na₂SO₄ (см. рисунок 2). Наличие в грунте небольших количеств Na₂SO₄ (0,5–1 %) дает некоторое снижение прочности цементогрунта. В этом случае можно предположить образование на частицах грунта гидратных оболочек, которые ослабляют молекулярные силы сцепления и препятствуют формированию коагуляционной структуры в начальной стадии твердения цементогрунта, уменьшая тем самым его конечную (на 28-й день) прочность.

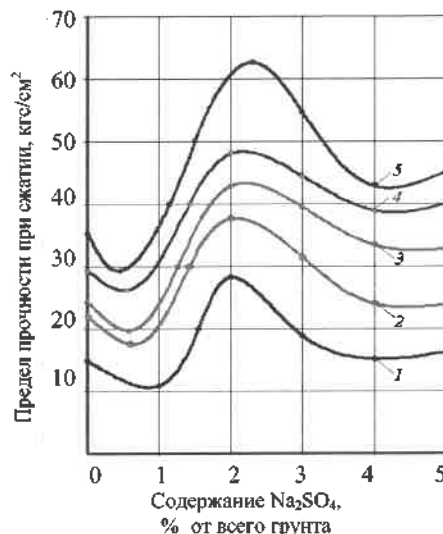


Рисунок 2 – Влияние содержания соли Na₂SO₄ на пределы прочности при сжатии суглинистого цементогрунта:
 1 – грунт + Na₂SO₄ + 6 % цемента; 2 – грунт + Na₂SO₄ + 8 % цемента;
 3 – грунт + Na₂SO₄ + 10 % цемента; 4 – грунт + Na₂SO₄ + 12 % цемента;
 5 – грунт + Na₂SO₄ + 14 % цемента

Увеличение содержания Na₂SO₄ до 2 % (а цемента с 14 до 3 %) дает прирост прочности цементогрунта примерно в 2 раза. Дальнейшее увеличение количества Na₂SO₄ ведет к некоторому снижению конечной прочности. Однако прочность цементогрунта, содержащего в своем составе 4–5 % сульфата натрия (при дозировке цемента 6–8 %), примерно равна прочности цементогрунта, не содержащего эту соль, а при дозировке цемента 10–14 % превышает ее [7].

Наиболее распространенными солями природных грунтов Западной Сибири являются соли щелочных металлов и чаще всего соли натрия NaCl, Na₂SO₄, Na₂CO₃. Влияние их на прочностные показатели суглинистого цементогрунта отражено в таблице 1.

Таблица 1 – Изменение предела прочности при сжатии образцов из цементогрунта в зависимости от степени засоления и содержания цемента (грунты искусственного засоления)

Наименование и состав грунта	Количество цемента, %		
	6	10	14
	Прочность при сжатии R ₂₈ , кгс/см ²		
Суглинок легкий незасоленный	31,7	45,4	60,0
Тот же суглинок:			
+0,5 % NaCl + 0,5 % Na ₂ SO ₄	35,0	48,3	58,9
+1,5 % NaCl + 0,5 % Na ₂ SO ₄	31,3	56,3	70,4
+0,5 % NaCl + 1,5 % Na ₂ SO ₄	34,5	49,4	64,0
+0,5 % Na ₂ CO ₃	33,7	50,9	63,3
+1,5 % NaCl + 0,5 % Na ₂ CO ₃	27,3	71,8	94,3
+0,5 % NaCl + 0,5 % Na ₂ CO ₃	29,6	45,4	59,9
+1,5 % Na ₂ SO ₄ + 0,5 % Na ₂ CO ₃	28,4	48,5	66,9
+0,5 % Na ₂ SO ₄ + 0,5 % Na ₂ CO ₃	37,0	57,2	68,1

Изменение морозостойкости цементогрунта в зависимости от вида и содержания солей характеризуется кривыми, представленными на рисунке 3.

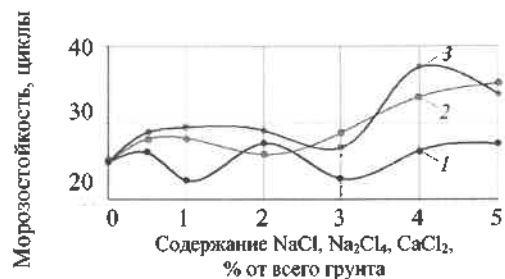


Рисунок 3 – Влияние содержания солей NaCl, Na₂SO₄, CaCl₂, на морозостойкость суглинистого цементогрунта, оцениваемой количеством циклов замораживания-оттаивания до полного разрушения:
1 – грунт + CaCl₂ + 12 % цемента;
2 – грунт + NaCl + 12 % цемента; 3 – грунт + Na₂SO₄ + 12 % цемента

Сульфат натрия Na₂SO₄ и хлорид натрия NaCl (при содержании их в грунте до 5 %) повышают морозостойкость цементогрунта примерно в 1,5 раза (с 23 циклов для незасоленных грунтов до 35–38 циклов для грунтов с большой концентрацией солей). Хлорид кальция CaCl₂ в пределах указанных концентраций значительного влияния на морозостойкость цементогрунта не оказывает.

Следует отметить, что испытания образцов цементогрунта на морозостойкость проводились с некоторым нарушением стандартной методики. Образцы замораживались до определенной температуры.

Удовлетворительную сходимость с результатами испытаний образцов из искусственно засоленных цементогрунтов дали испытания грунтов естественного засоления, укрепленных 12 % портландцемента марки 400 (таблица 2).

Таблица 2 – Морозостойкость цементогрунтов различного состава

Наименование и состав укрепляемого грунта	Марка цемента	Количество цемента, %	Предел прочности при сжатии (R ₂₈), кгс/см ²		Коэффициент морозостойкости
			в водонасыщенном состоянии до замораживания	после 15 циклов замораживания-оттаивания	
Суглинок: легкий незасоленный	400	12	52,7	47,2	0,89
легкий незасоленный, гумуса 2,9 %	400	12	40,5	22,3	0,55
легкий засоленный, солей 0,54 %	400	12	49,0	41,2	0,83
пылеватый засоленный, 1 % солей	400	12	43,0	31,8	0,74
Супесь легкая незасоленная	400	12	31,4	27,6	0,87
Чернозем супесчаный засоленный, 3,25 % солей, гумуса более 4 %	400	12	11,7	10,2	0,88
Супесь тяжелая засоленная, 1,18 % солей, гумуса нет	400	12	47,0	38,2	0,81
Супесь тяжелая засоленная, 1,65 % солей, гумуса нет	400	12	37,2	32,2	0,86

Нами были произведены исследования для выявления расчетных показателей искусственных засоленных грунтов, стабилизированных «Битумной эмульсией» в лабораторных условиях, а также в полевых условиях в Ферганской области на участке 82 км автодороги Р-126 «к. Баликчи-к. – Мингбулок-к. Найман-к. – Пунгон». При испытаниях были использованы рычажные приборы Маслова – Лурье и одноплоскостные срезы, используемые при испытании грунтов (рисунок 4).

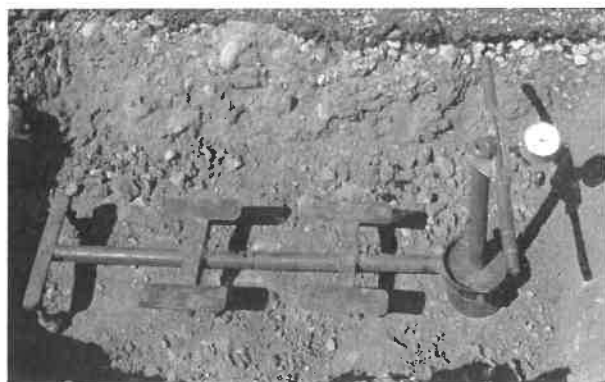


Рисунок 4 – Рычажные приборы Маслова – Лурье при испытании автомобильной дороги Р-126

В таблице 3 приведены результаты лабораторных исследований стабилизированных и нестабилизированных «битумной эмульсией» искусственно засоленных с 5 % NaCl супесей легких пылеватых [8].

Таблица 3 – Расчетные показатели супесей легких пылеватых, стабилизированных и нестабилизированных «Битумной эмульсией»

Коэффициент уплотнения K _{уп}	Расчетные показатели грунтов					
	нестабиллизированных			стабилизированных		
	E, МПа	φ, град	C, МПа	E, МПа	φ, град	C, МПа
0,96	56	26	0,024	65	29	0,030
0,98	65	26	0,034	75	29	0,041
1,00	78	26	0,045	89	29	0,054

Примечание – Расчетные параметры грунтов были определены при влажности 0,55W_{тек}.

Из результатов исследования, приведенных в таблице 3, выявлено, что при коэффициенте уплотнения у стабилизированного грунта повышаются: модуль эластичности – до 89 МПа (на 12 %); сила сцепления – на 0,054 МПа (на 15 %); сила сцепления – на 29 град (около 10 %).

Полученные таким образом характеристики лёссовых грунтов рабочего слоя со стабилизатором и без

него от коэффициента уплотнения K_y и влажности грунтов при испытании W_p можно представить в виде системы

$$\left. \begin{aligned} E_{0,e} &= E_0 (1,80 - 1,22W_x) + \Delta E_3 (19,13K_3 - 17,99); \\ C_{0,c} &= C_0 (2,52 - 2,68W_x) + \Delta C_3 (17,17K_3 - 16,12); \\ \varphi_{0,c} &= \varphi_0 (2,38 - 2,24W_x), \end{aligned} \right\} (1)$$

где $E_0 = 72$ МПа, $C_0 = 0,031$ МПа, $\varphi_0 = 31^\circ$; $\Delta E_3 = 26$ МПа, $\Delta C_3 = 0,029$ МПа.

Чтобы убедиться, что полученное уравнение действительно с достаточной точностью описывает изучаемый процесс, определяли дисперсией неадекватности и дисперсией воспроизводимости.

По результатам полевых испытаний можно рекомендовать коэффициент уплотнения $K_{уп}$ грунтов для дорожных насыпей, достигаемый существующими уплотняющими машинами по её высоте (таблица 4).

Таблица 4 – Рекомендуемый коэффициент уплотнения рабочего слоя из засоленного грунта

Глубина расположения (от покрытия) слоя, м	Толщина слоя, м	Коэффициент уплотнения $K_{уп}$
$H_{до} + 0,4$	0,40	1,02 + битумная эмульсия
$(H_{до} + 0,4) \dots 1,0$	0,60	1,00
$(H_{до} + 1,0) \dots 1,5$	0,50	0,98
Естественное основание	0,30	0,98 + битумная эмульсия
Примечание – $H_{до}$ – толщина дорожной одежды.		

Учитывая возможность неблагоприятного сочетания предельного количества солей с большим содержанием гумуса и отрицательное влияние в некоторых случаях минерального состава грунта, окончательно

заключение о пригодности засоленных грунтов в каждом частном случае следует принимать после проведения соответствующих лабораторных испытаний.

Зачастую наличие в укрепляемых грунтах легко-растворимых солей является положительным фактором, позволяющим снизить расход цемента, а также успешно производить работы по укреплению грунтов осенью и весной при малых отрицательных температурах.

Список литературы

- 1 Худайкулов, Р. М. Обоснование расчетных характеристик засоленных грунтов насыпей земляного полотна : дис. ... д-ра филос. (PhD) по техническим наукам. – Ташкент, 2018. – 133 с.
- 2 Каюмов, А. Д. Уплотнение и расчетные характеристики лессовых грунтов / А. Д. Каюмов. – Ташкент : Фан, 2004. – 120 с. – Предм. указ.: с. 22–24, 38–41.
- 3 Roads and Salinity ISBN: 0734753772 // Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources 2003. – 26 b.
- 4 Научно-технический отчет по теме «Теоретическое и практическое исследование влияния различного качества и количества солей в грунте на их водно-физические и механические свойства». – Ташкент, 2012. – Ч. 1. – 90 с.
- 5 Кочеткова, Р. Г. Особенности улучшения свойств глинистых грунтов стабилизаторами / Р. Г. Кочеткова // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2006. – № 3. – С. 23–27.
- 6 Каюмов, А. Д. Поведение лессовых грунтов / А. Д. Каюмов, Д. А. Махмудова, Р. М. Худайкулов // Автомобильные дороги. – 2014. – № 06(991). – С. 93–94.
- 7 Сухоруков, А. В. Обоснование региональных расчётных значений характеристик глинистых грунтов для проектирования дорожных одежд в условиях Западной Сибири : дис. ... канд. техн. наук. – Томск. – 2017. – 148 с. – Предм. указ. : С. 86–90.
- 8 Худайкулов, Р. М. Расчетные характеристики засоленных грунтов, используемых в транспортном строительстве // Метро и тоннели. – 2016. – № 1. – С. 32–36.

Получено 01.03.2019

R. M. Hudaykulov, T. L. Mirzayev. Strengthening the subgrade of roads with the use of cement.

Use of local economic materials contributes to the pace of construction and reconstruction of roads. One of these materials is cement-reinforced soil. In recent years, they are increasingly used to base pavement. However, in the field of design and construction of pavements with structural layers of cement ground, many provisions require verification and refinement. The authors of the article paid attention to the complex strengthening of soils simultaneously with cements and organic binders (bitumen). The use of latter increases the water resistance and durability of soil aggregates. The authors have conducted studies to identify the calculated indicators of artificial saline soils, reinforced with cement, stabilized with bitumen emulsion in laboratory and field conditions. This article discusses the improvement, strength and deformation characteristics of loess soils used in the construction of road pavements with complex reinforcement.