

**ПРОЧИЕ ВОПРОСЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ / OTHER QUESTIONS RELATED TO
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**

DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2022.25.6>

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗОЛЬНЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ИСКУССТВЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГЛИНИСТЫХ
ГРУНТОВ**

Научная статья

Абрамова Т.Т. *

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (attoma[at]mail.ru)

Аннотация

Показано, что для глубинного закрепления слабых (глинистых) грунтов можно использовать отходы теплоэнергетики с помощью буромесительной технологии. Опыты в лабораторных условиях проводились на суглинке и активной золе ($\text{CaO} = 29.3\%$). Критериями качества закрепления служили прочность и водостойкость. Испытания образцов осуществлялись по двум схемам: через 1 и 21 сутки после их упрочнения в зависимости от дозировок золы к грунту. Для улучшения структурирования зологрунта были добавлены 9 видов поверхностно-активных веществ (ПАВ). Для получения требуемого результата количество и концентрация ПАВ должны быть оптимальными. Выявлено, что эффективность этих добавок зависит от условий твердения зологрунта.

Ключевые слова: зольные отходы, закрепление, прочность, водостойкость, поверхностно-активные вещества.

THE USE OF ASH WASTE FOR THE ARTIFICIAL TRANSFORMATION OF CLAY SOILS

Research article

Abramova T.T.*

Moscow State University, Moscow, Russia

* Corresponding author (attoma[at]mail.ru)

Abstract

The study demonstrates that for the deep fixing of weak (clay) soils, waste heat energy can be used via drilling technology. The study carried out laboratory experiments on loam and active ash ($\text{CaO} = 29.3\%$) with strength and water resistance as the criteria for the quality of fastening. The samples were tested according to two schemes: 1 and 21 days after their hardening, depending on the dosages of ash to the ground. To improve the structuring of the ash soil, 9 types of surfactants (surfactants) were added. To obtain the desired result, the amount and concentration of surfactants must be optimal. It is determined that the effectiveness of these additives depends on the conditions of hardening of the ash soil.

Keywords: ash waste, fixing, strength, water resistance; surfactants.

Введение

Взаимодействие инженерного сооружения с геологической средой представляет сложный процесс. Такое взаимодействие очень часто вызывает наиболее глубокие изменения геологической среды и нередко требует осуществления защитных мероприятий, обеспечивающих как надежность и устойчивость сооружения, так и ограничение негативных изменений геологической среды. В связи с этим актуальной и практически важной геотехнической задачей является целенаправленное управление реакцией грунтов с изменением их свойств. Характер изменения свойств грунтов при этом сводится, в первую очередь, к значительному увеличению прочности, водо- и морозостойкости, уменьшению водопроницаемости в результате изменения состава и характера структурных связей. К настоящему времени разработано и предложено большое количество различных методов, способов и приемов, позволяющих с помощью искусственного воздействия на грунты решать разнообразные инженерные задачи как в качестве самостоятельных мер, так и в комплексе с другими видами мероприятий. Среди современных приемов управления качеством геологической среды выделяются разнообразные методы буромесительной технологии. Их основные преимущества не только экономичность, экологичность (используется местный грунт без его выемки), но и отсутствие вибраций. Большой вклад в развитие технологии перемешивания грунтов внесли как зарубежные ученые (Van Impe, M. Topolnicki, B.N. Jasperse, Jacobson и др.), так и отечественные (В.М. Безрук, В.Е. Соколович, Э.В. Мокс, А.Н. Токин, А.В. Шапошников и др.). Определено, что степень пригодности грунтов для их упрочнения цементом зависит от состава, свойств грунтов и вяжущего. Для песчаных и супесчаных грунтов наиболее эффективно использовать цемент. Обширные исследования показали, что преобразование глинистых грунтов с помощью цемента представляет наибольшие трудности [1], [2].

Поэтому целью данных исследований явилась попытка определения возможности использования отходов теплостанций (зол) для упрочнения глинистых грунтов. Для интенсификации физико-химического взаимодействия, вяжущего с грунтом и улучшения их перемешивания при создании однородной массы был опробован широкий спектр современных поверхностно-активных веществ (ПАВ).

При проведении эксперимента изменялось влияние:

- количества золы в зависимости от её доли в объеме зологрунта на показатели его прочности и водостойкости;
- типа ПАВ на интенсификацию физико-химических реакций при упрочнении грунта;
- содержания ПАВ на длительную прочность и водостойкость зологрунта.

Основная часть

Основной задачей данных исследований явилось определение возможности преобразования слабых грунтов золой уноса с помощью буросмесительной технологии, в результате которого за счёт глубинного перемешивания образуется однородная масса зологрунта.

Представленные в работе лабораторные исследования проводились на легком пылеватом суглинке (Ig Шбл), максимально залегающем в северной части Санкт-Петербурга, в гранулометрическом составе которого содержание частиц 0.05–0.01 мм – 40%, < 0.01 мм – 26%, < 0.001 мм – 11%. Число пластичности составляет 8 %. Пористость в ненарушенном сложении – 45.4%. Химический состав представлен: SiO_2 – 77.4%, Al_2O_3 – 8.8%, Fe_2O_3 – 2.9%. В минеральном составе преобладают алюмосиликаты – 80%.

В качестве вяжущего использовалась зола (после сжигания бурых углей) Ирша-Бородинского месторождения. Приурочено месторождение к Бородинской мульде, занимающей Северо-Восточную часть Рыбинского угленосного района. Зола содержит большое количество CaO (29.3%) и Fe_2O_3 (1.9%). Кроме этого, в её составе содержится SiO_2 – 52.1%, Al_2O_3 – 6.0%, MgO – 5.0%, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ – 1.1% и SO_3 – 4.6%.

Критерием качества зологрунтового материала были выбраны прочность на одноосное сжатие и водостойкость в зависимости от дозировки золы – грунта, условий и длительности его твердения. В связи с этим образцы грунта с золой готовились в соотношениях соответственно 30 : 70, 40 : 60 и 50 : 50 с добавлением воды до получения жидко-тягучей консистенции. Полученная зологрунтовая смесь заливалась в определенные формы, диаметр которых соответствовал высоте. Затем образцы из форм вынимались и помещались в условия воздушно-влажной среды ($W=100\%$) на 1 сутки (1 схема испытаний) и 21 сутки (2 схема).

Анализ полученных результатов показал, что наиболее оптимальным является зологрунтовый материал с составом соответственно 40 : 60 (грунт : зола). Образцы данного состава после 1 суток твердения в воздушно-влажной среде приобретают незначительную прочность 0.05 МПа (образцы готовились без уплотнения), которая к 21 сут. возрастает до значений 1.5 МПа. Длительное хранение образцов (до 90 сут.) в водной среде практически не сказывается на их прочностных характеристиках, однако они обладают высокой водоустойчивостью (99%) (табл. 1). Структурирование зологрунта по 2 схеме испытаний продолжается и в водных условиях с возрастанием значений прочностных характеристик до значений 3.7 МПа (табл. 2).

Многолетние исследования в различных странах мира показали, что повышение водоустойчивости глинистых грунтов можно обеспечить, используя поверхностно-активные вещества (ПАВ), позволяющие стабилизировать такие грунты при небольшом расходе ПАВ. Добавками ПАВ можно регулировать сроки твердения грунтоцементных смесей, управлять процессами структурообразования при укреплении грунтов. Действие ПАВ зависит от его состава и концентрации в смеси. В работе О.И. Лукьяновой, П.А. Ребиндера показано изменение фазового состава продуктов гидратации C_3A в присутствии добавок поверхностно-активного вещества [3]. Известно, что улучшение реологических свойств дисперсных глинистых грунтов за счет добавок малых количеств ПАВ происходит по причине изменения гидратных оболочек глинистых частиц [4], [5] и за счет адсорбции ПАВ на поверхности частиц глинистых минералов [6]. И.С. Чоборовская [7], изучая адсорбцию высокомолекулярных ПАВ на поверхности различных мономинералов, отмечает, что она носит избирательный характер. Следовательно, введением активных реагентов можно значительно улучшить физико-механические характеристики глинистых грунтов и сделать их пригодными к использованию в строительных работах.

Для получения требуемого результата в грунтовой системе количество ПАВ должно быть оптимальным. Если его количество больше оптимального, то адсорбция ПАВ приводит к понижению прочности между частицами. Кроме этого, как установил Ф.Д. Овчаренко [8], одна и та же концентрация ПАВ в водном растворе для глинистых грунтов разного минерального состава может также дать противоположный эффект.

В практике современного строительства для получения прочных, водонепроницаемых и долговечных материалов на основе цемента и бетона широко используются ПАВ. Они значительно влияют на скорость и направление процессов структурообразования при упрочнении грунтоцементного материала [9]. Если применение ПАВ для бетонов уже стало обязательным, то для зологрунтов такие исследования встречаются крайне редко. Анализ химических добавок, поступающих на строительный рынок России, позволил выделить и использовать в данной работе некоторые из них: I – пенообразователи; II – неионогенные ПАВ; III – суперпластификаторы.

Вспененные растворы (I) представляют собой материалы, включающие твердую, жидкую и газообразные фазы. Эти водорастворимые сульфаты – сильные ПАВ, широко применяются в качестве моющих средств («Прогресс»).

Хорошей растворимостью в водной среде и малым поверхностным натяжением характеризуются отобранные вещества (Фларинол Н, Фларинол Ф) за счет их неионогенных свойств (II).

Суперпластификаторы (III) существенно улучшают строительно-технологические свойства бетона, обеспечивая увеличение подвижности бетонной смеси без снижения его прочности. Их разделяют по видам в зависимости от химического состава. В данной работе использовались:

- «С-3» - смесь натриевых солей полиметиленафталинсульфокислот;
- «Докпласт» - комплекс на основе элементоорганических и (Ti, Al, Si...) соединений;
- «LBS», «M10+50», «LDS PLUS 12» - полиакрилаты.

Таблица 1 – Прочность на одноосное сжатие и водостойкость закрепленных образцов (1 схема испытаний)

группа	№ обр.	Состав, %			Прочность, МПа		Водостойкость, % сутки								
					среда										
					в/вл.	водная									
		грунт	зола	ПАВ	1 суг.	90 суг.	1	7	14	21	28	42	70	90	
	0	40	60	-	0,05	0,05	100	100	100	99	99	99	99	99	
I	1	40	60	0,1	-	0,70	100	100	100	100	100	100	100	100	
	2	40	60	0,5	-	0,05	100	100	100	100	100	100	100	100	
II	3	40	60	0,5	0,05	0,50	100	100	100	100	100	100	100	100	
	4	40	60	0,5	0,05	0,30	100	99	99	99	99	99	99	99	
III	5	40	60	0,3	-	0,70	100	100	100	100	100	100	100	100	
	6	40	60	0,1	-	0,70	100	99	99	98	98	98	98	98	
	7	40	60	0,3	-	0,10	100	100	100	100	100	100	100	100	
	8	40	60	0,3	-	0,05	100	100	100	100	100	100	100	100	
	9	40	60	0,8	0,05	0,60	100	100	100	100	100	100	100	100	

Примечание: ПАВы – 1 - «Прогресс» 0,1%; 2 - «Прогресс» 0,5%; 3 - «Флариол Н» 0,5%; 4 - «Флариол Ф» 0,5%; 5 - «LBS» 0,3%; 6 - «Докпласт» 0,1%; 7 - «M10+50» 0,3%; 8 - «LDS PLUS 12» 0,3%; 9 - «С-3» 0,8%

Таблица 2 – Прочность на одноосное сжатие и водостойкость закрепленных образцов (2 схема испытаний)

группа	№ обр.	Состав, %			Прочность, МПа		Водостойкость, % сутки								
					среда										
					в/вл.	водная									
		грунт	зола	ПАВ	21 сут.	90 сут.	1	7	14	21	28	42	70	90	
	0	40	60	-	1,5	3,7	100	100	100	100	100	100	100	100	
I	1	40	60	0,1	1,7	4,0	100	100	100	100	100	100	100	100	
	2	40	60	0,5	2,3	3,7	100	100	100	100	100	100	100	100	
II	3	40	60	0,5	-	3,1	100	100	100	100	100	100	100	100	
	4	40	60	0,5	-	3,7	100	100	100	100	100	100	100	100	
III	5	40	60	0,3	2,4	4,1	100	100	100	100	100	100	100	100	
	6	40	60	0,1	2,7	2,7	100	100	100	100	100	100	100	100	
	7	40	60	0,3	2,2	3,7	100	100	100	100	100	100	100	100	
	8	40	60	0,3	1,9	4,4	100	100	100	100	100	100	100	100	
	9	40	60	0,8	-	3,1	100	100	100	100	100	100	100	100	

Примечание: номера в таблице 2 соответствуют номерам в таблице 1

Все отобранные ПАВ хорошо растворимы в воде и вводились в зологрунт (40 : 60) в смеси с водой в небольших количествах от 0.1 до 0.8% (см. примечание к таблице).

Данные по прочности на одноосное сжатие и водостойкости закрепленных образцов с выбранными 9 добавками ПАВ представлены в таблицах 1, 2 по двум схемам испытаний. Введение всех выбранных добавок ПАВ к зологрунту показало улучшение его свойств при длительном хранении в водной среде. При 98–100% водостойкости образцов прочность через 90 суток водонасыщения колеблется в пределах 0.05 – 0.7 МПа (1 схема испытаний) и до 2.7 – 4.4 МПа (2 схема) в зависимости от состава ПАВ (табл. 1 и 2). Испытание образцов с помощью первой схемы, однако, показало снижение их массы к 21 суткам хранения в воде до 1.4%. Увеличение срока твердения зологрунта до 21 суток не приводит к снижению массы образцов при длительном нахождении в воде.

Длительное твердение образцов (1 схема испытаний) в течение 90 суток приводит к значительному возрастанию прочностных свойств (до 14 раз) с высокой водостойкостью. Введение растворов «Прогресс» (0.5%) и LDS PLUS 12 (0.3%) в зологрунты не улучшают их прочностные показатели по сравнению с образцами, где концентрация этих растворов снижена до 0.1%. Следовательно, использовать такие высокие концентрации ПАВ не требуется при данных условиях.

При использовании 2 схемы твердения образцов зологрунта в водных условиях прочность может увеличиться до 2.4 раза (90 сут.).

Проведенные ранее работы по использованию ПАВ для улучшения свойств связных грунтов с применением LBS, LDS PLUS 12, M 10+50 доказали высокую морозоустойчивость упрочненных грунтов [10].

Заключение

Важным результатом работ явилась возможность создания нового геотехногенного грунтового массива с улучшенными свойствами. Использование бурсмесительной технологии для преобразования отходов ТЭЦ поможет в дальнейшем в предотвращении экологических последствий. Прекращение роста площадей, занимаемых золоотвалами, их существенное уменьшение будет способствовать предотвращению загрязнения атмосферы, подземных и поверхностных вод.

Показано, что применение зольных отходов для преобразования глинистых грунтов позволяет значительно улучшить их физико-механические и водно-физические характеристики.

Введение ПАВ в зологрунтовую систему позволяет регулировать сроки ее твердения и управлять процессами структурообразования.

Conflict of Interest

None declared.

Конфликт интересов

Не указан.

Список литературы / References

1. Безрук В.М. Теоретические основы укрепления грунтов цементом / В.М. Безрук. – М.: Автостройиздат, 1956. – 241 с.
2. Ланько С.В. Буромесительная технология закрепления грунтов: Учебное пособие / С.В. Ланько, В.В. Конюшков. – Б.м.: Лань, 2018. – 52 с.
3. Лукьянова О.И. Новое в применении неорганических вяжущих веществ для закрепления дисперсных материалов / О.И. Лукьянова, П.А. Ребиндер // Материалы VI Всесоюзного совещания по закреплению и уплотнению грунтов. – М.: изд-во МГУ, 1968. – С. 20-24.
4. Круглицкий Н.Н. Физико-химические основы регулирования свойств дисперсий глинистых грунтов / Н.Н. Круглицкий – Киев: Наукова думка, 1968. – 320 с.
5. Кульчицкий Л.И. Физико-химические основы формирования свойств глинистых пород / Л.И. Кульчицкий – М.: Недра, 1981. – 178 с.
6. Шаркина Э.В. Строение и свойства органоминеральных соединений / Э.В. Шаркина – Киев: Наукова думка, 1976. – 91 с.
7. Чоборовская И.С. Зависимость эффективности укрепления грунтов сульфитно-спиртовой бардой от их свойств (без укрепителей) при строительстве дорожных покрытий и оснований / И.С. Чоборовская // Материалы VI Всесоюзного совещания по закреплению и уплотнению грунтов. – М.: изд-во МГУ, 1968. С. 153–158.
8. Овчаренко Ф.Д. Гидрофильность глин и глинистых минералов / Ф.Д. Овчаренко – Киев: изд-во АН УССР, 1961. – 291 с.
9. Гончарова Л.В. Исследование процессов структурообразования в цементогрунтах на разных стадиях упрочнения в целях оценки их долговечности / Л.В. Гончарова, В.И. Баранова // Материалы VII Всесоюзного совещания по закреплению и упрочнению грунтов. – Ленинград: Энергия, 1971. – С.16-21.
10. Абрамова Т.Т. Использование стабилизаторов для улучшения свойств слабых грунтов / Т.Т. Абрамова, А. И. Босов, К.Э.Валиева // Геотехника. – 2012. – № 3. – С. 4–28.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bezruk V.M. Teoreticheskie osnovy ukreplenija gruntov cementami [Theoretical bases of strengthening soils with cements] / V.M. Bezruk. – Moscow: Avtostrojizdat, 1956. – 241 p. [in Russian]
2. Lan'ko S.V. Burosmesitel'naja tehnologija zakreplenija gruntov: Uchebnoe posobie [Deep soil mixing technology for soil stabilization] / S.V. Lan'ko. – Tutorial Lan', 2018. – 52 p. [in Russian]
3. Luk'janova O.I. Novoe v primenении neorganicheskikh vjazhushchih veshhestv dlja zakreplenija dispersnyh materialov [New in the use of inorganic binders for stabilization particulate materials] / O.I. Luk'janova, P.A. Rebinder // Materialy VI Vsesojuznogo soveshhanija po zakrepleniju i uplotneniju gruntov [Proc. of the 6th All-Russian conference on stabilization and compaction of soils] – Moscow: publishing house MSU, 1968. – Pp. 20-24. [in Russian]
4. Kruglickij N.N. Fiziko-himicheskie osnovy regulirovanija svojstv dispersij glinistykh gruntov [Physico-chemical bases for regulating the properties of dispersions of clay soils] / N.N. Kruglickij. – Kiev: Naukova dumka, 1968. – 320 p. [in Russian]
5. Kul'chickij L.I. Fiziko-himicheskie osnovy formirovanija svojstv glinistykh porod [Physico-chemical bases of the formation of the properties of clay rocks] / L.I. Kul'chickij – Moscow: Nedra, 1981. – 178 p. [in Russian]
6. Sharkina E.V. Stroenie i svojstva organomineral'nyh soedinenij [Structure and properties of organomineral compounds] / E.V. Sharkina. – Kiev: Naukova dumka, 1976. – 91 p. [in Russian]
7. Choborovskaja I.S. Zavisimost' jeffektivnosti ukreplenija gruntov sul'fitno-spirovoy bardoj ot ih svojstv (bez ukrepitelej) pri stroitel'stve dorozhnykh pokrytij i osnovanij [Dependence of the effectiveness of soil strengthening with sulphite-alcohol stillage on their properties (without hardeners) in the construction of road surfaces and foundations] / I.S. Choborovskaja // Materialy VI Vsesojuznogo soveshhanija po zakrepleniju i uplotneniju gruntov [Proc. of the 6th All-Russian conference on stabilization and compaction of soils] – Moscow: publishing house MSU, 1968. – Pp. 153-158. [in Russian]
8. Ovcharenko F.D. Gidrofil'nost' glin i glinistykh mineralov [Hydrophilicity of clays and clay mineral] / F.D. Ovcharenko. – Kiev: publishing house Academy of sciences USSR, 1961. – 291 p. [in Russian]
9. Goncharova L.V. Issledovanie processov strukturoobrazovanija v cementogrunтах na raznykh stadijah uprochnenija v celjah ocenki ih dolgovechnosti [Study of the processes of structure formation in cement soils at different stages of hardening in order to assess their durability] / L.V. Goncharova, V.I. Baranova // Materialy VII Vsesojuznogo soveshhanija po zakrepleniju i uprochneniju gruntov [Proc. of the 7th All-Russian conference on stabilization and compaction of soils] – Leningrad: Jenergija, 1971. – Pp. 16-21. [in Russian]
10. Abramova T.T. Ispol'zovanie stabilizatorov dlja uluchshenija svojstv slabych gruntov [Application of soil stabilizers for improving cohesive soils properties] / T.T. Abramova, A.I. Bosov, K.E. Valieva // Geotehnika [Geotechnics]. – Moscow: Geomarceting, 2012. – № 3. – Pp. 4-28.