

УДК 691.41

Способы стабилизации и укрепления иольдиевых глин и слабых глинистых грунтов при создании земляного полотна в районах Крайнего Севера

М. Абу-Хасан, В. Я. Соловьева, А. С. Сахарова

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Абу-Хасан М., Соловьева В. Я., Сахарова А. С. Способы стабилизации и укрепления иольдиевых глин и слабых глинистых грунтов при создании земляного полотна в районах Крайнего Севера // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 444–454. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-444-454

Аннотация

Цель: Определение наиболее эффективных способов и компонентов для укрепления слабых иольдиевых глин, используемых при создании транспортных магистралей в регионах Севера. **Методы:** Определение основных физико-механических характеристик глинистого грунта проводилось в соответствии с требованиями: ГОСТ 12536—2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава»; ГОСТ 25584—2016 «Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации»; ГОСТ 22733—2016 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности»; ГОСТ 5180—2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик»; ГОСТ 25100—2020 «Грунты. Классификация». Показано, что эффективное укрепление слабого глинистого грунта достигается в результате его предварительной стабилизации при помощи гранулированного доменного шлака или природного известняка фракции $\approx 2,5$ мм. Рациональное количество гранулированного доменного шлака или известняка составляет 15 мас.% от массы грунта, и при этом глинистый грунт имеет наибольшее значение прочности (2,25–2,45) МПа. Разница в показателях прочности в пользу известняка составляет 9,0 %. Экспериментально установлено, что для повышения прочности укрепляемого глинистого грунта эффективно использовать гранулированный доменный шлак в сочетании с тонкомолотым доменным шлаком, рациональное количество которого составляет 10 мас.% от массы грунта, достигаемая прочность которого соответствует маркам М20–М25. Определено, что для комплексного улучшения показателей прочности, плотности, морозостойкости необходимо к глинистому грунту, укрепленному доменным металлургическим шлаком, дополнительно ввести реакционно-активные компоненты, в качестве которых эффективно использовать портландцемент в количестве не более 5 мас.% от массы грунта в сочетании с сухой комплексной химической добавкой «ПРА», рациональное количество которой составляет 2,0 мас.% от массы (ПЦ + ТДШ). **Практическая значимость:** Стабилизированный и комплексно укрепленный слабый глинистый грунт характеризуется следующими фактическими показателями: $M50 F35 K_{10} = 0,026$ м/сут, который может быть использован в качестве основания при строительстве транспортных магистралей местного значения в регионах Севера.

Ключевые слова: Глинистый грунт, стабилизация, укрепление, прочность, коэффициент фильтрации, гранулированный доменный шлак, тонкомолотый шлак, химическая добавка.

Введение

При проектировании и строительстве дорожных конструкций в районах Крайнего Севера необходимо создавать основание и верхнее дорожное покрытие, отличающиеся повышенной прочностью на сжатие и особенно повышенной прочностью на растяжение при изгибе, с целью повышения устойчивости всей дорожной конструкции, которая эксплуатируется в особых условиях.

В рассматриваемой климатической зоне распространены мерзлые грунты, которые содержат лед, имеют отрицательную температуру и находятся в мерзлом состоянии достаточно длительный период, но при этом необходимо учитывать, что в короткий летний период наступает положительная температура $\approx (0-10)^\circ\text{C}$ и происходит сезонное неравномерное оттаивание грунта на глубину от 0,2 до 2 м [1, 2].

При строительстве дорог повышенные требования к дорожному покрытию предъявляются по показателям трещиностойкости, твердости, долговечности (в том числе морозостойкости), соответственно, при подготовке основания дорожного полотна необходимо учитывать эти требования.

На территории зоны многолетней мерзлоты в большинстве регионов распространены глинистые грунты, которые относятся к слабым грунтам. Глина содержит более 30 % мелких частиц, которые связаны между собой, это очень пластичный материал. Для глинистых грунтов характерна пониженная водопроницаемость, поэтому в массиве глинистого грунта содержится повышенное количество воды, из-за присутствия которой грунт такой природы при отрицательных температурах вспучивается, он может сжиматься и разжиматься, вследствие чего снижается несущая способность основания [3, 4].

Глинистый грунт очень хорошо поглощает и удерживает воду, при замерзании эта вода превращается в лед, следовательно, грунт увеличивается в объеме.

Это наиболее распространенный вид деформации — пучение земляного полотна. Наибольшее пучение происходит при дополнительном поступлении воды, перемещающейся в мерзлый грунт из нижележащих талых слоев грунта [5–7].

Учитывая вышесказанное, в районах Крайнего Севера, где строительство земляного полотна ведется при наличии слабых глинистых грунтов, например на основе иольдиевых глин, их использование в качестве основания дорожного полотна возможно только при выполнении мероприятий, которые способны обеспечить устойчивость основания дороги, ускорить его осадку, а также увеличить прочность дорожной конструкции. Для земляного полотна на слабых грунтах должна быть исключена возможность выдавливания слабого грунта из-под насыпи, необходимо обеспечить устойчивость, стабильность основания, его осадка должна завершиться не менее чем на 80 % до возведения дорожного покрытия.

Для устройства дорог в северных регионах в целях исключения затрат на транспортировку материалов целесообразно использовать местные грунты, предварительно подвергнутые укреплению. Под укреплением понимают изменение первоначальных свойств грунта и преобразование их в прочный и морозоустойчивый слой дорожной одежды с необходимыми заданными физико-механическими свойствами [8–11].

Для этого требуется достаточно тщательная подготовка основания с целью повышения его прочности, надежности и повышения плотности, решению задачи такого рода посвящено данное научно-экспериментальное исследование.

Материалы и методы исследования

1. Одной из разновидностей глин, представленных в северных регионах России, являются иольдиевые глины, состоящие из сильноразрушенных частиц гидрослюд и кварца. Иольдиевые глины образовались на месте существую-

щих Балтийского и частично Белого морей, эти глины содержат до 90 % частиц менее 0,005 мм. Иольдиевые глины относятся к слабым грунтам и создают проблему при дорожном строительстве, снижая несущую способность основания дороги. Грунт, содержащий иольдиевую глину, имеет высокие значения природной влажности (часто превышающие предел текучести), слабую водопроницаемость и очень низкие прочностные характеристики.

В качестве материалов, способных стабилизировать грунт, т. е. понизить его влажность, увеличить плотность, что должно способствовать упрочнению связного глинистого грунта, могут служить как природные материалы, такие как известняки определенных фракций, так и техногенные материалы [12].

2. Известняковый и доломитовый щебень или песок — это разновидности горной породы, которые по химическому составу представлены карбонатами кальция и магния с примесями частиц извести, кварца, марганца и железа. Для известняковых и доломитовых материалов характерны следующие показатели:

- плотность в пределах: 2700–2900 кг/м³;
- прочность — соответствует маркам М600–М800, т. е. материал относится к среднепрочным;
- морозостойкость — соответствует марке F150.

Хорошие показатели прочности и морозостойкости известнякового материала являются основанием использовать его для стабилизации слабых глинистых грунтов.

3. Кроме природных материалов, для стабилизации слабых грунтов может быть использован отход металлургического производства — гранулированный доменный шлак.

Металлургический доменный шлак как отход производства в больших количествах образуется на металлургических комбинатах и занимает в виде отвалов большие площади. В металлурги-

ческой промышленности шлак — это многокомпонентный неметаллический расплав, покрывающий поверхность жидкого металла в ходе металлургического процесса плавки.

Использование этого отхода, кроме поставленной задачи, целесообразно как с экологической точки зрения, поскольку металлургический доменный шлак как техногенный отход является источником загрязнения прилегающих территорий, так и с экономической, так как шлак, имеющий в своем составе кальций-магниево-силикатные соединения, обладающие вяжущими свойствами, может при определенных условиях быть заменой дорогостоящих материалов, например портландцемента, используемых в настоящее время для укрепления грунтов.

Гранулированный доменный шлак состоит из тех же оксидов, что и портландцемент. Металлургические доменные шлаки содержат оксиды кальция (30–50 %), магния (1–18 %), кремния (28–38 %), алюминия (8–24 %). В зависимости от соотношения этих оксидов шлаки подразделяются на основные (преобладают оксиды Са и Mg), кислые (с преобладанием Al₂O₃ и SiO₂). Кроме основных оксидов доменные шлаки содержат оксиды железа, марганца.

Крупность шлакового отхода может быть различной, куски достигают значительных размеров, поэтому для дальнейшего использования такие куски подвергают дроблению до размеров щебня фракции (5–20) мм, (20–40) мм или песка фракции (0–2,5) мм. При тонком помоле доменный гранулированный шлак приобретает гидратационную активность и проявляет свойства вяжущего.

4. Для увеличения реакционной способности системы и, соответственно, увеличения плотности и прочности укрепляемого грунта могут быть использованы тонкомолотый доменный шлак, тонкомолотый известняк, традиционный портландцемент.

ТАБЛИЦА 1. Результаты определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава пробы глинистого грунта

№ п/п	Плотность частиц грунта $\rho_{г}$, г/см ³	Гигроскопическая влажность грунта, W_r , %	Содержание фракций грунта, %										
			Более 10	10–5	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,002	Менее 0,002
1	1,92	1,2	—	—	0,12	0,57	1,60	5,4	6,9	8,8	27,3	29,5	19,51

С целью увеличения реакционной активности системы, ее упрочнения, формирования новых гибких и прочных структурных связей за счет образования новых гидратных соединений, ведущих к увеличению устойчивости к трещинообразованию, целесообразно дополнительно использовать химическую активацию путем использования сухой комплексной химической добавки на основе поликарбоксилатных полимеров в сочетании с реакционно-активными солями на основе катиона калия. Используемая химическая добавка имеет техническое название «ПРА» [13–15].

Научные исследования проводились с учетом требований ГОСТ для каждого вида испытания.

Определение основных физико-механических характеристик глинистого грунта проводилось в соответствии с требованиями:

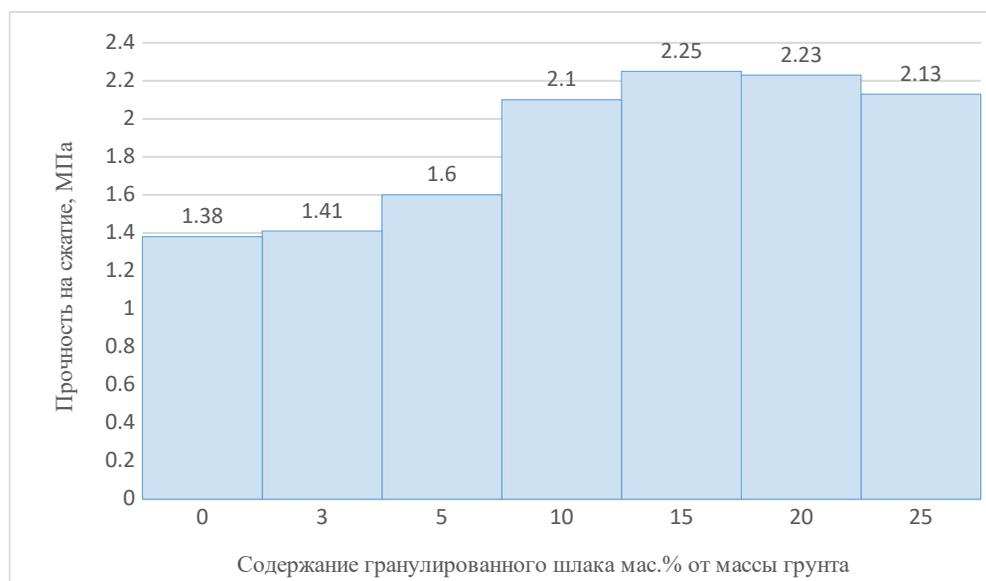
- ГОСТ 12536—2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава»;
- ГОСТ 25584—2016 «Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации»;
- ГОСТ 22733—2016 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности»;
- ГОСТ 5180—2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик»;
- ГОСТ 25100—2020 «Грунты. Классификация».

Результаты исследований

В данном исследовании использован грунт, который по данным физико-механических исследований имел следующие характеристики:

1. Зерновой состав представлен в табл. 1.
 2. Влажность грунта в естественном состоянии — 18,9 %.
 3. Насыпная плотность в естественном состоянии — 1660 кг/м³.
 4. Насыпная плотность в сухом состоянии — 1390 кг/м³.
 5. Содержание частиц менее 0,005 мм — 76,31 %.
 6. Содержание песчаных частиц (2–0,05 мм) — 23,27 %.
 7. Число пластичности, t_p — 16,9 %.
 8. Максимальная плотность грунта — 1,92 г/см³.
 9. Коэффициент фильтрации, K_f — 0,003 м/сут.
- В соответствии с ГОСТ 25100—2020 «Грунты. Классификация» и результатов физико-механических исследований используемый грунт соответствует категории «глина легкая песчаная», представленный грунт-неводопроницаемый.
- Эффективность используемых материалов для стабилизации и укрепления глинистого грунта оценивали по изменению показателя прочности образцов в возрасте 7 суток в водонасыщенном состоянии.
- Для исследования изготавливались образцы-цилиндры диаметром 7 см и высотой 7 см путем прессования под давлением 15 МПа. Оценка эффективности действия гранулированного и тонкомолотого доменных шлаков по стабилизации и укреплению глинистого грунта представлены на рисунке и в табл. 2.

Анализ данных, представленных в табл. 2, показывает, что гранулированный доменный



Прочность грунта, стабилизированного гранулированным доменным шлаком фракции $\approx 2,5$ мм

ТАБЛИЦА 2. Прочностные характеристики укрепляемого глинистого грунта при использовании гранулированного доменного шлака и известняка

Содержание стабилизатора, мас.% от массы грунта											
Гранулированный					Прочность на сжатие, МПа/%	Известняк					Прочность на сжатие, МПа/%
0	10	15	20	25		0	10	15	20	25	
+	-	-	-	-	1,38/100	+	-	-	-	-	1,51/100
-	+	-	-	-	2,10/152	-	+	-	-	-	2,31/115
-	-	+	-	-	2,25/163	-	-	+	-	-	2,45/120
-	-	-	+	-	2,21/160	-	-	-	+	-	2,39/114
-	-	-	-	+	2,03/154	-	-	-	-	+	2,16/96

шлак и природный известняк обладают достаточно близким эффектом по стабилизации глинистого грунта. Наибольшее значение прочности (2,25 МПа) имеет глинистый грунт, при использовании гранулированного доменного шлака в количестве 15 мас.% от массы грунта и 2,45 МПа при использовании известняка также в количестве 15 мас.% от массы грунта. Разница в показателях прочности в пользу известняка составляет $\approx 9,0$ %, но учитывая, что гранулированный доменный шлак является отходом металлургического производства и его утилизация имеет важное значение для защиты окружающей среды от загрязнения и захламления твердыми отходами, дальнейшие исследования по укреплению глини-

стого грунта необходимо проводить для грунта, предварительно стабилизированного гранулированным доменным шлаком фракции $\approx 2,5$ мм.

Основной фазой гранулированного доменного шлака являются кальций-магниево-силикаты типа окерманита $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$, которые при увеличении площади поверхности, а также в результате механической активации обладают способностью повышать реакционную активность. В связи с вышесказанным представляло научный интерес исследовать эффективность действия тонкомолотого доменного шлака (ТДШ) относительно глинистого грунта, стабилизированного гранулированным доменным шлаком.

ТАБЛИЦА 3. Оценка эффективности совместного действия шлаков

№ п/п	Гранулированный доменный шлак			Тонкомолотый доменный шлак			Прочность на сжатие, МПа/%
	Количество шлака, мас.% от массы грунта						
	10	15	20	5	10	15	
1	+			+	–		2,35/100
2	+				+		2,38/152
3	+					+	2,54/150
4		+		+			2,62/146
5		+			+		2,76
6		+				+	2,58
7			+	+			2,51
8			+		+		2,56
9			+			+	2,32

Результаты проведенных исследований представлены в табл. 3.

При рассмотрении эффективности совместного действия гранулированного доменного шлака и тонкомолотого шлака (табл. 3) оказалось положительным и установлено, что добавление тонкомолотого компонента в виде шлака приводит к увеличению прочности грунта. Наибольшее значение прочности укрепляемого грунта происходит при совместном действии 15 % гранулированного доменного шлака и 10 % тонкомолотого шлака. Дальнейшее увеличение тонкомолотого шлака не способствует упрочнению грунта.

Установлено, что глинистый грунт, стабилизированный и укрепленный доменным шлаком, имеет максимальную прочность на сжатие (2,6–2,7) МПа, что соответствует марке М20–М25. Полученные результаты являются недостаточными для создания прочной, устойчивой к трещинообразованию и надежной транспортной магистрали, поэтому необходимо усилить подготовку основания. Для повышения эффективности укрепления грунта, повышения его плотности, прочности и морозостойкости целесообразно использовать компоненты, обладающие повышенной реакционной активностью, и компоненты, усиливающие реакционную активность твердеющей системы.

В качестве реакционного компонента исследовали портландцемент, который способен самостоятельно проявлять гидратационную активность в широком диапазоне положительных температур от +5 до +40 °С, сопровождающуюся выделением тепла, и который традиционно используется для укрепления грунтов. Обычно усиление реакционной активности компонентов укрепляемого основания или другой твердеющей системы осуществляется под действием комплексных химических добавок. При проведении настоящих исследований, направленных на создание высокоэффективного основания, использована сухая высокоэффективная комплексная химическая добавка на поликарбоксилатной основе, модифицированная веществами органической и неорганической природы по ГОСТ 24211. Сухая комплексная химическая добавка имеет техническое название «ПРА».

Результаты научно-экспериментальных исследований по оценке эффективности совместного действия гранулированного доменного шлака, портландцемента и комплексной химической добавки на степень уплотнения и повышения прочности глинистого грунта представлены в табл. 4.

Анализ данных, представленных в табл. 4, показывает, что степень уплотнения глинистого грунта значительно повышается в присутствии всех исследуемых компонентов: гранулирован-

ТАБЛИЦА 4. Оценка эффективности комплексного укрепления глинистого грунта

№ п/п	Укрепляемый грунт	Гранулированный доменный шлак (15 мас.% от массы)	Тонкомолотый доменный шлак (ТДШ) (10 мас.% от массы грунта)	Портландцемент (ПЦ), мас.% от массы грунта			Сухая реакционно-активная химическая добавка «ПРА» (2,0 мас.% от массы ПЦ + ТДШ)	Прочность на сжатие, МПа
				5,0	10,0	12,0		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Глина легкая песчанистая	+	–	–	–	–	–	2,25
		–	+	–	–	–	–	1,67
		+	+	–	–	–	–	2,89
		+	+	+	–	–	–	3,8
		+	+				–	4,2
		+	+				–	4,3
		+	+	+	–	–	+	4,9
		+	+	–	+	–	+	5,4
		+	+	–	–	+	+	5,5

ного доменного шлака фракции $\approx 2,5$ мм, тонкомолотого доменного шлака с величиной удельной поверхности $S_{уд} \geq 300$ м²/кг и комплексной химической добавки «ПРА». Совместное присутствие компонентов усиливает эффективность действия каждого компонента.

Экспериментально определено, что максимальное количество портландцемента составляет 10 мас.% от массы грунта, но при этом необходимо отметить, что 5,0 мас.% портландцемента от массы грунта более чем в 2 раза повышает прочность стабилизированного грунта, дальнейшее увеличение портландцемента незначительно (\approx до 10 %) повышает прочность укрепленного грунта, поэтому рационально и целесообразно использовать 5,0 мас.% портландцемента от массы грунта.

Состав № 7 (см. табл. 4) подвергли комплексным физико-механическим испытаниям, в результате которых получены следующие характеристики укрепленного глинистого грунта:

- плотность укрепленного грунта — 2,17 г/см³;
- прочность на сжатие — 5,3 МПа;
- прочность на растяжение при изгибе — 1,3 МПа;
- морозостойкость — $F = 35$;
- коэффициент фильтрации — $K_{10} = 0,026$ м/сут.

Грунт с данными характеристиками может быть использован при строительстве дорожной магистрали в суровых условиях Севера.

Результаты обсуждений

Для создания высокоэффективной транспортной магистрали местного или федерального значения каждый этап строительства имеет важное значение и оказывает влияние на надежность и долговечность всего сооружения.

На начальном этапе необходимо осуществить эффективное укрепление грунта, которое заключается в создании не только прочного материала, но важно, чтобы укрепление основания обеспечило бы эффективный отвод воды, что особенно важно в период повышенного весеннего таяния снега или ливневых дождей. Также важно, чтобы основание было морозостойчивым, особенно в условиях многолетней мерзлоты.

Проведенные научно-экспериментальные исследования показали, что в Северных регионах встречаются большие территории со слабыми глинистыми грунтами, которые при проведении комплексных мероприятий необходимо превратить в прочное надежное основание.

По результатам проведенных исследований установлено, что эффективно с технологической

и экологической точек зрения использовать гранулированный доменный шлак фракции $\approx 2,5$ мм в количестве 15 мас.% от массы грунта для его стабилизации, что способствует повышению прочности и повышению коэффициента фильтрации глинистого грунта.

Дальнейшее укрепление целесообразно производить при помощи тонкомолотого доменного шлака (ТДШ), рациональное количество которого составляет 10 мас.% от массы грунта.

Установлено, что реакционная активность и эффективность укрепляющего действия ТДШ значительно повышается в присутствии портландцемента в количестве 5 мас.% от массы грунта, которое является достаточным для достижения максимально возможного эффекта. Для повышения реакционной активности всей укрепляемой системы грунта целесообразно дополнительно вводить сухую комплексную химическую добавку на поликарбоксилатной основе «ПРА», количество которой составляет 2,0 мас.% от массы (ПЩ + ТДШ).

Комплексное укрепление слабого глинистого грунта обеспечивает создание основания со следующими фактическими показателями: М50F35 $K_{10} = 0,026$ м/сут. Такое основание может быть рекомендовано для создания транспортных магистралей местного значения в суровых северных регионах.

Заключение

Научно-экспериментальные исследования показали, что для создания транспортных магистралей на проблемных глинистых грунтах в суровых условиях северного региона требуется эффективная подготовка основания.

Целесообразно слабые глинистые грунты стабилизировать гранулированным доменным шлаком фракции $\approx 2,5$ мм с целью повышения прочности и коэффициента фильтрации грунта.

Реакционная активность стабилизированного глинистого грунта достигается при комплексном использовании тонкомолотого доменного шлака и портландцемента в сочетании с сухой комплексной химической добавкой «ПРА».

Комплексно укрепленные глинистые грунты достигают фактических показателей (М50F35 $K_{10} = 0,026$ м/сут) и могут быть рекомендованы для изготовления транспортных магистралей местного значения в суровых северных регионах.

Библиографический список

1. Абу-Хасан М. С. Влияние различных видов армирования на деформационные характеристики глинистого грунта в условиях сезонного замерзания и оттаивания / М. С. Абу-Хасан, В. В. Егоров // Серия конференций ИОР: Материаловедение и инженерия. — 2020. — Т. 753. — Вып. 4, 5. — DOI: 10.1088/1757-899X/753/4/042083.
2. Аввад Т. Численный анализ с использованием модели упругопластического грунта для одиночной сваи в глиняном слое для изучения влияния дополнительной нагрузки на распределение поверхностного трения / Т. Аввад, С. Аль Кодси, В. Улицкий, А. Шашкин, Л. Аввад // Конспект лекций по гражданскому строительству. — 2020. — № 49. — С. 499–506. — DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_52.
3. Соловьева В. Высокоэффективная ремонтная смесь для восстановления и защиты поврежденных бетонных конструкций / В. Соловьева, И. Степанова, Д. Соловьев, А. Касаткина // Конспект лекций по гражданскому строительству ссылка отключена. — 2020. — № 50. — С. 369–375. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_38.
4. Шершнева М. Геоэкозащитные экраны при строительстве и эксплуатации дорог в холодных регионах / М. Шершнева, А. Сахарова, И. Козлов // Конспект лекций по строительству ссылка отключена. — 2020. — № 50. — С. 347–356. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_36 27.
5. Егоров В. Применение эволюционного алгоритма оптимизации шпренгелевых систем транспортных зданий

и сооружений для северных районов / В. Егоров, А. Кравченко, М. Абу-Хасан // Серия конференций ИОП: Материаловедение и инженерия. — 2020. — С. 753(2). — DOI:10.1088/1757-899X/753/2/022020.

6. Богомолова Н. Особенности инженерных изысканий в районах распространения вечной мерзлоты на примере проекта «Северный широтным способом» / Н. Богомолова, Ю. Милюшкан, С. Шкурников и др. // Конспект лекций по гражданскому строительству. — 2020. — № 50. — С. 215–221. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_23 31.

7. Клемяционок П. Экстраполяция кривых сжатия на высокие давления для мягких глинистых грунтов / П. Клемяционок, С. Колмогорова, С. Колмогоров // Конспект лекций по гражданскому строительству. — 2020. — № 50. — С. 233–238. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_25 32.

8. Бабак Н. Структура атомов основной фазы промышленных отходов прогнозирует свойства строительных материалов в транспортном строительстве в холодных регионах / Н. Бабак // Конспект лекций по гражданскому строительству. — 2020. — Т. 50 — С. 451–457. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_47. 33.

9. Белаш Т. А. Сейсмостойкость зданий на оттаивающих многолетнемерзлых грунтах / Т. А. Белаш, Т. В. Иванова // Строительный журнал. — 2020. — № 93(1). — С. 50–59. — DOI: 10.18720/MCE.93.5 34.

10. Богданова Г. Методика оценки параметров реакции многоэтажных зданий с нелинейными динамическими виброгасителями при сейсмических воздействиях / Г. Богданова, А. Бенин // Конспект лекций по гражданскому строительству. — 2022. — № 180. — С. 553–564. — DOI:10.1007/978-3-030-83917-8_50.

11. Николаев С. В. Методика выбора эффективного погружения и контроля глубины заполнения строительных материалов с открытой текстурой / С. В. Николаев, А. В. Бенин, А. М. Попов // Journal of Physics: Conference Series this link is disabled. — 2021. — № 2131(2). — DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022055 36.

12. Huang W. Снижение гидратации глины путем добавления органического стабилизатора / W. Huang, Y. Zhang, Z. Luo Et al. // Глины и глинистые минералы. — 2021. — Т. 69. — С. 489–499 (2021). — DOI: 10.1007/s42860-021-00139-4 37.

13. Соловьева В. Повышение уровня свойств композиционных материалов для строительных геоконструкций с применением добавок нового поколения / В. Соловьева, И. Степанова, Д. Соловьев и др. // Конспект лекций по строительству неорганических добавок. — 2020. — № 50. — С. 387–393. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_40 38.

14. Соловьева В. Многофункциональные наномодифицированные бетоны нового поколения / В. Соловьева, И. Степанова, Д. Соловьев и др. // Конспект лекций по строительному строительству ссылка отключена. — 2020. — № 50. — С. 377–386. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_39. 39.

15. Соловьева В. Восстановление поврежденных геоснований на транспорте с использованием высокоэффективного ремонтного раствора / В. Соловьева, Д. Соловьев, И. Степанова, А. Касаткина // MATEC Web of Conferences. — 2018. — № 239. — DOI:10.1051/mateconf/201823901015.

Дата поступления: Май 20, 2022

Решение о публикации: June 05, 2022

Контактная информация:

АБУ-ХАСАН Махмуд Самиевич — д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»; abukhasan@pgups.ru

СОЛОВЬЕВА Валентина Яковлевна — д-р техн. наук, проф., заведующая кафедрой «Инженерная химия и естествознание»; 9046185117@mail.ru

САХАРОВА Антонина Сергеевна — канд. техн. наук, доц. кафедры «Инженерная химия и естествознание»; asakharova@pgups.ru

Methods for Stabilizing and Strengthening Yoldian Clays and Weak Clay Soils When Creating a Subgrade in the Far North Regions

M. Abu-Khasan, V. Ya. Soloviova, A. S. Sakharova

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: *Abu-Khasan M., Soloviova V. Ya., Sakharova A. S. Methods for Stabilizing and Strengthening Yoldian Clays and Weak Clay Soils When Creating a Subgrade in the Far North Regions // Proceedings of Petersburg Transport University, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 444–454. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-444-454*

Summary

Purpose: Definition of the most effective methods and components for strengthening weak Yoldian clays used in the creation of transport routes in the North regions. **Methods:** The definition of the main physical-mechanical characteristics of clay soil was carried out in accordance with the requirements: of GOST (Russia State Standard) 12536—2014 “Soils. Methods for laboratory determination of granulometric (grain) and microaggregate composition”; GOST 25584—2016 “Methods for laboratory determination of the filtration coefficient”; GOST 22733—2016 “Soils. Method for laboratory determination of maximum density”; GOST 5180—2015 “Soils. Methods of laboratory determination of physical characteristics”; GOST 25100—2020 “Soils. Classification”. It is shown that the effective strengthening of weak clay soil is achieved as a result of its preliminary stabilization with the help of granulated blast-furnace slag or natural limestone of ≈ 2.5 mm fraction. The rational amount of granulated blast-furnace slag or limestone is 15 wt.% of the soil mass and at the same time, clay soil has the highest strength value — (2.25–2.45) MPa. The difference in strength indicators in favor of limestone constitutes 9.0%. It has been experimentally established that in order to increase reinforced clay soil strength it is effective to use granulated blast-furnace slag in combination with finely ground blast-furnace slag which rational amount of is 10 wt.% of soil mass which achieved strength of corresponds to M20–M25 grade. It has been defined that for comprehensive improvement of the indicators as strength, density, and frost resistance it is necessary to introduce additionally to clay soil, reinforced with blast-furnace metallurgical slag as reactive components which it's effective to use Portland cement in amount of not more than 5 wt.% of soil mass in combination with dry complex chemical additive “PRA” which rational amount of constitutes 2.0 wt.% by weight of (Portland cement + finely ground blast-furnace slag). **Practical significance:** Stabilized and comprehensively strengthened weak clayey soil is characterized by the following actual indicators: M50 F35 K10 — 0.026 m/day which can be used as a base at construction of transport routes of local importance in the regions of the North.

Keywords: Clay soil, stabilization, strengthening, strength, filtration coefficient, granulated blast-furnace slag, finely ground slag, chemical additive.

References

1. Abu-Khasan M. S., Egorov V. V. Vliyaniye razlichnykh vidov armirovaniya na deformatsionnye kharakteristiki glinistogo grunta v usloviyakh sezonnogo zamerzaniya i ottaivaniya [Effect of Different Types of Reinforcement on the Deformation Characteristics of Clay Soil under Seasonal Freezing and Thawing Conditions IOP Conference] *Seriya konferentsiy IOP: Materialovedenie i inzheneriya* [Conference Series: Materials Science and Engineering]. 2020, vol. 753, I. 4, 5. DOI: 10.1088/1757-899X/753/4/042083. (In Russian)

2. Avvad T., Al' Kods S., Ulitskiy V., Shashkin A., Avvad L. *Chislennyy analiz s ispol'zovaniem modeli uprugoplasticheskogo grunta dlya odinochnoy svai v glinyanom sloe dlya izucheniya vliyaniya dopolnitel'noy nagruzki na raspredelenie poverkhnostnogo treniya* [Numerical analysis using an elastic-plastic soil model for a single pile in a clay layer to study the effect of additional load on the distribution of surface friction]. 2020, I. 49, pp. 499–506. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_52. (In Russian)

3. Solov'eva V., Stepanova I., Solov'ev D., Kasatkina A. *Vysokoeffektivnaya remontnaya smes' dlya vosstanovleniya*

- i zashchity povrezhdennykh betonnykh konstruksiy* [Highly effective repair mortar for the restoration and protection of damaged concrete structures]. 2020, pp. 369–375. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_38. (In Russian)
4. Shershneva M., Sakharova A., Kozlov I. *Geoekozashchitnye ekrany pri stroitel'stve i ekspluatatsii dorog v kholodnykh regionakh* [Geo-environmental screens in the construction and operation of roads in cold regions]. 2020, pp. 347–356. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_36 27. (In Russian)
5. Egorov V., Kravchenko A., Abu-Khasan M. *Primenenie evolyutsionnogo algoritma optimizatsii shprengel'nykh sistem transportnykh zdaniy i sooruzheniy dlya severnykh rayonov* [Application of an evolutionary algorithm for optimizing sprenge systems of transport buildings and structures for northern regions]. *Seriya konferentsiy IOP: Materialovedenie i inzheneriya* [IEP Conference Series: Materials Science and Engineering]. 2020, pp. 753(2). DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022020. (In Russian)
6. Bogomolova N., Milyushkan Yu., Shkurnikov S., Bushuev N., Svintsov E., Anisimov V. *Osobennosti inzhenernykh izyskaniy v rayonakh rasprostraneniya vechnoy mertzloty na primere proekta «Severnyy shirotnym sposobom»* [Features of engineering surveys in permafrost areas on the example of the Northern Latitudinal Method project]. 2020, pp. 215–221. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_23 31. (In Russian)
7. Klemyatsionok P., Kolmogorova S., Kolmogorov S. *Ekstrapolyatsiya krivykh szhatiya na vysokie davleniya dlya myagkikh glinistykh gruntov* [Extrapolation of compression curves to high pressures for soft clay soils]. 2020, pp. 233–238. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_25 32. (In Russian)
8. Babak N. *Struktura atomov osnovnoy fazy promyshlennykh otkhodov prognoziruet svoystva stroitel'nykh materialov v transportnom stroitel'stve v kholodnykh regionakh* [The structure of atoms of the main phase of industrial waste predicts the properties of building materials in transport construction in cold regions]. 2020, pp. 451–457. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_47.33. (In Russian)
9. Belash T. A., Ivanova T. V. *Seysmostoykost' zdaniy na ottaivayushchikh mnogoletnermzlykh gruntakh* [Seismic resistance of buildings on thawing permafrost soils]. *Stroitel'nyy zhurnal* [Construction Journal]. 2020, I. 93 (1), pp. 50–59. DOI: 10.18720/MCE.93.5 34. (In Russian)
10. Bogdanova G., Benin A. *Metodika otsenki parametrov reaktsii mnogoetazhnykh zdaniy s nelineynymi dinamicheskimi vibrogasitelyami pri seysmicheskikh vozdeystviyakh* [A technique for assessing the response parameters of multi-storey buildings with non-linear dynamic vibration dampers under seismic effects]. 2022, pp. 553–564. DOI:10.1007/978-3-030-83917-8_50. (In Russian)
11. Nikolaev S. V., Benin A. V., Popov A. M. *Metodika vybora effektivnogo pogruzeniya i kontrolya glubiny zapolneniya stroitel'nykh materialov s otkrytoy teksturoy* [A technique for selecting effective immersion and controlling the depth of infill in open texture building materials Journal of Physics]. 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022055 36. (In Russian)
12. Huang, W., Zhang, Y., Luo, Z., Wei, X., Fu, H. *Snizhenie gidratatsii gliny putem dobavleniya organicheskogo stabilizatora. Gliny i glinistye mineral* [Reducing Clay Hydration by Adding an Organic Stabilizer. Clays and Clay Minerals]. 2021, vol. 69, pp. 489–499. DOI: 10.1007/s42860-021-00139-4 37. (In Russian)
13. Solov'eva V., Stepanova I., Solov'ev D., Ershikov N. *Povyshenie urovnya svoystv kompozitsionnykh materialov dlya stroitel'nykh geokonstruksiy s primeneniem dobavok novogo* [Increasing the level of properties of composite materials for building geostructures using new generation additives Lecture notes on the construction of inorganic additives]. 2020, pp. 387–393. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_40 38. (In Russian)
14. Solov'eva V., Stepanova I., Solov'ev D., Kravchenko T. *Mnogofunktsional'nye nanomodifitsirovannyye betony novogo pokoleniya* [Multifunctional nanomodified concretes of a new generation Abstract of lectures on building construction link disabled]. 2020, pp. 377–386. (In Russian)
15. Solov'eva V., Solov'ev D., Stepanova I., Kasatkina A. *Vosstanovlenie povrezhdennykh geosnovaniy na transporte s ispol'zovaniem vysokoeffektivnogo remontnogo ras-tvora MATEC Web of Conferences* [Restoration of damaged geobases in transport using a highly effective repair solution MATEC Web of Conferences]. 2018. DOI: 10.1051/matec-conf/201823901015. (In Russian)

Received: May 20, 2022

Accepted: June 05, 2022

Author's information:

Mahmud S. ABU-KHASAN — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Department of Construction Structures, Buildings and Constructions; abukhasan@pgups.ru
 Valentina Ya. SOLOVIOVA — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head. Department of Engineering Chemistry and Natural Science; 9046185117@mail.ru
 Antonina S. SAKHAROVA — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Engineering Chemistry and Natural Science; asakharova@pgups.ru