

УДК: 691
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.26
EDN: VJMIZO



Исследование влияния отходов металлургических производств на физико-механические показатели грунтов

Д.С. Смирнов¹, Г.Ф. Шагинурова¹, М.Т. Шарифуллин²

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

²ООО «УК Профи», г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Дорожно-строительная отрасль остро нуждается во внедрении более дешевых и эффективных дорожно-строительных материалов, которые позволят улучшить качество дорожных одежд, увеличить их межремонтный срок, что, в свою очередь, позволит сократить расходы на эксплуатационное обслуживание автомобильных дорог. Использование отходов производства в изготовлении дорожно-строительных материалов может способствовать снижению стоимости дорожно-строительных материалов, параллельно решая проблему загрязнения окружающей среды. В работе исследуется влияние стабилизирующих добавок на физико-механические свойства суглинка. Целью работы является оценка влияния активных минеральных добавок на физико-механические свойства грунта. Для достижения цели решаются следующие задачи: производится отбор и испытание проб грунта на соответствие его нормативным требованиям; определяются характеристики минеральной добавки «Минпласт», полученной на основе отходов металлургического производства, и извести, которые будут использованы в качестве стабилизаторов грунта; производится оценка физико-механических характеристик стабилизированного грунта, а также индекса несущей способности и калифорнийского числа.

Результаты. Модифицирование грунта минеральной добавкой повышает его индекс несущей способности в 1,5 раза. Показатель калифорнийского числа увеличивается на 20%. Введение минеральной добавки «Минпласт» в грунт, в количестве 2 %, позволяет повысить плотность и модуль упругости. Кроме того, наблюдается значительное увеличение показателя угла внутреннего трения.

Выводы. Использование активной минеральной добавки «Минпласт» позволило в значительной степени улучшить физико-механические характеристики грунта. Низкая себестоимость, по сравнению с другими минеральными вяжущими используемыми в качестве стабилизирующих добавок, делает его применение весьма перспективным.

Ключевые слова: стабилизация грунтов, отходы металлургических производств, металлургические шлаки, суглинок.

Для цитирования: Смирнов Д.С., Шагинурова Г.Ф., Шарифуллин М.Т. Исследование влияния отходов металлургических производств на физико-механические показатели грунтов // Известия КГАСУ, 2024, № 4(70), с. 294-305, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.26, EDN: VJMIZO

Study of the influence of metallurgical waste on the physical and mechanical properties of soils

D.S. Smirnov¹, G.F. Shaginurova¹, M.T. Sharifullin²

¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

²ООО "UK Profi", Kazan, Russian Federation

Abstract: The road construction industry is in dire need of introducing cheaper and more efficient road construction materials that will improve the quality of road pavement, increase its service life, which in turn will reduce the cost of road maintenance. The use of manufacturing wastes for the production of road construction materials can help reduce the cost of road construction materials, simultaneously solving the problem of environmental pollution. The paper studies the effect of stabilizing additives on the physical and mechanical properties of loam. The objective of the work is to assess the effect of active mineral additives on the physical and mechanical properties of soil. To achieve this objective, the following tasks are solved: soil samples are selected and tested for compliance with regulatory requirements; the characteristics of "Minplast" mineral additive obtained on the basis of metallurgical waste and lime, which will be used as soil stabilizers, are determined; the physical and mechanical characteristics of the stabilized soil, as well as the bearing capacity index and the California bearing ratio, are assessed.

Results. Modification of soil with a mineral additive increases its bearing capacity index by 1.5 times. The California bearing ratio increases by 20%. Introduction of "Minplast" mineral additive into the soil, in the amount of 2%, allows increasing the density and elastic modulus. In addition, a significant increase in the angle of internal friction is observed.

Conclusions. The use of "Minplast" active mineral additive has significantly improved physical and mechanical characteristics of the soil. Low cost, compared to other mineral binders used as stabilizing additives, makes its use very promising.

Keywords: soil stabilization, metallurgical waste, metallurgical slag, loam

For citation: Smirnov D.S., Shaginurova G.F., Sharifullin M.T. Study of the influence of metallurgical waste on the physical and mechanical properties of soils // News of KSUAE, 2024, № 4(70), с. 294-305, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.26, EDN: VJMIZO

1. Введение

На больше части территорий Республики Татарстан грунты представлены супесями и суглинками. Они хорошо впитывают и накапливают влагу, и если их не стабилизировать, то в последствии дорожное полотно может столкнуться с такими дефектами, как пучины и просадки.

Стабилизация глинистых грунтов позволяет повысить их несущую способность, уменьшить усадку и деформацию, улучшить водопроницаемость и устойчивость к воздействию влаги. Это позволяет уменьшить риски разрушения сооружений и значительно увеличить срок их службы.

Поэтому актуальность стабилизации глинистых грунтов в строительстве неоспорима, и ее важность будет только увеличиваться с ростом объемов строительства и возрастанием требований к устойчивости и безопасности сооружений транспортной инфраструктуры.

Проблемой укрепления и стабилизации грунтов в нашей стране занимались многие исследователи еще с середины 50-х годов. Основы данного направления изложены в работах Ребиндера П.А., Егорова И.В., Мищенко М.Ф. и др. [1,2]. В качестве модифицирующих добавок улучшающих физико-механические характеристики грунта рассматривались как минеральные, так и органические вяжущие выбор которых обусловлен исходными характеристиками самого грунта. На современном этапе развития дорожно-строительной отрасли особую актуальность приобретает использование в качестве стабилизирующих добавок различных отходов промышленного производства, например, золы-уноса [3]. Специалистами ООО «Белтекс» [4] предложено в качестве

компонента состава для модификации грунтов использовать комплексную смесь, в состав которой входит доменный шлак и известь, совместно с гипсом и цементом. Исследователи Петербургского института путей сообщений [5] пишут о модификации грунтов твердыми отходами металлургической промышленности, благодаря чему структурообразование и набор прочности грунта протекает не только в воздушной, но и во влажной среде. Во всех случаях увеличивается несущая способность грунта и снижается его водонасыщение. Известны составы для стабилизации грунта на основе цеолита и добавок полимерного типа [6-8]. Для повышения межремонтных сроков автомобильных дорог сотрудниками Казанского государственного архитектурно-строительного университета рекомендовано укрепленный грунт дополнительно модифицировать пластификатором [9]. Повышение физико-механических характеристик грунта может быть достигнуто либо его укреплением, либо стабилизацией. На сегодняшний день проблемами стабилизации грунта, кроме автора данной статьи, в КГАСУ больше никто не занимается. Исследования в области укрепления грунта проводит Вдовин Е.А.. На самом деле понятия в определенной степени близкие, например, для повышения характеристик индекса несущей способности и калифорнийского числа, а также снижения набухания в ГОСТе рекомендуется проводить стабилизацию или укрепление. Хотя сами эти характеристики оцениваются только у стабилизированных грунтов. Интерес представляет работа авторов Тульского государственного университета [10], в которой удалось значительно повысить несущую способность водонасыщенного илесто-глинистого грунта путем введения в него армоэлементов из дробленого бетона.

Кроме разработки различных составов для стабилизации, многие авторы изучают и модернизируют существующие технологические процессы. Так, известны методы химической модификации грунтов [11, 12], метод его укрепления при помощи раздвижной гибкой трехмерной решетки [13], а также метод эффективной стабилизации при помощи инновационных стабилизирующих добавок в вяжущие [14]. Не менее эффективными с точки зрения формирования несущей способности грунта являются стабилизация по технологии «Knipro Nano – System» [15], с применением водной смеси концентрата Perma-Zyme [16], а также с использованием шлакощелочных вяжущих при фрезерно-инъекционной технологии [17]. Данные технологии и методики, совместно с применением различных полимерных добавок, а также отходов промышленности, в частности, металлургической, позволяют получить материал, устойчивый к воздействию внешних факторов. Грунт становится прочнее, не разъезжается под действием нагрузок и не пропускает влагу [18].

В последнее время актуальным становится применение компьютерных технологий [19] при выполнении работ по повышению несущей способности грунта, что позволяет значительно сократить временные и трудовые ресурсы.

Целью работы является улучшение физико-механических свойств грунтов путем введения активной минеральной добавки «Минпласт», полученной на основе отходов металлургического производства, а именно металлургических шлаков. Для достижения цели решаются следующие задачи: производится отбор и испытание проб грунта на соответствие его нормативным документам; определяются характеристики металлургических шлаков и извести, которые будут участвовать в процессе стабилизации грунта; производится испытание стабилизированного грунта по определению его индекса несущей способности и калифорнийского числа CBR.

2. Материалы и методы

Для проведения исследования был отобран суглинок легкий пылеватый. Физико-механические характеристики которого приведены в таблицах 1-2, а также на рисунке 1. Грунт соответствует требованиям ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация».

Таблица 1

Гранулометрический состав грунта

Размер сит, мм	Более 10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	Менее 0,05
Частный остаток, %	0,00	0,00	0,43	2,38	4,96	6,25	15,61	3,47	66,89
Полный остаток, %	0,00	0,00	0,43	2,82	7,78	14,03	29,64	33,11	100,00

Таблица 2

Физические характеристики грунта

Наименование показателей	Требования ГОСТ 25100-2020	Фактическое значение
Естественная влажность, %	Не нормируется	18,6
Влажность на границе текучести, %	Не нормируется	33,6
Влажность на границе раскатывания, %	Не нормируется	22,7
Число пластичности, ед.	$0,07 < I_p \leq 0,12$	0,11
Показатель текучести	$I_L < 0$	-0,38
Максимальная плотность скелета грунта, г/см ³	Не нормируется	1,71
Оптимальная влажность, %	Не нормируется	19,8
Коэффициент переувлажнения	Не более 1,15	0,94



Рис. 1. График зависимости максимальной плотности грунта от оптимальной влажности (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Graphic dependence of maximum soil density versus optimal humidity (illustration by the authors)

В качестве стабилизирующего компонента была использована активная минеральная добавка «Минпласт» производства «УК Профи». Характеристики добавки приведены в таблицах 3-4.

Таблица 3

Химический состав добавки Минпласт

Наименование показателя	Требования	Факт
Массовая доля содержания оксида магния (MgO), %, не более	18,0	15
Массовая доля содержания оксида серы (VI) (S), %, не более	2,5	1,3
Массовая доля содержания хлорид-иона (Cl ⁻), %, не более	0,1	0,05
Щелочные оксиды (Na ₂ O+0,658K ₂ O), %, не более	1,0	0,7

Окончание таблицы 3

Массовая доля содержания (CaO + MgO + SiO ₂), %, не менее	67,0	82
Отношение массовых долей (CaO + MgO)/ (SiO ₂), не менее	1,0	3
Содержание стекловидной фазы, %, не менее	70,0	83
Содержание влаги (влажность), %, не более	0,5	0,4
Потери массы при прокаливании, %, не более	5,0	4,4

Таблица 4

Физико-механические показатели добавки Минпласт

Наименование показателя	Требования	Факт
Размер зерна:		
Содержание фракции < 0,080 мм, %, не менее	99,9	100
Содержание фракции < 0,045 мм, %, не менее	98,0	99,5
Удельная поверхность (по методу воздухопроницаемости), м ² /кг, не менее	480	485
Прочность на сжатие в возрасте 28 суток, МПа, при твердении в нормальных условиях, не менее	8	9,0
Начало схватывания, минут, не ранее	150	160
Равномерность изменения объема (расширение), мм, не более	10	15

Характеристики извести представлены в таблице 5.

Таблица 5

Характеристики извести негашеной

Наименование показателя	Характеристика
Сорт	2
Содержание активных CaO + MgO	До 86%
Содержание MgO	0,56%
Содержание CO ₂	0,25%
Время и температура гашения	До 4 минут 77°С
Содержание естественных радионуклидов	19,5 Бк/кг
Размер гранул	От 0 до 40 мм

3. Результаты и обсуждение

Проведены испытания грунта, стабилизированного активной добавкой металлургического шлака, известью и совместным составом. Результаты испытаний представлены на рисунках 2-5, а также в таблице 6.

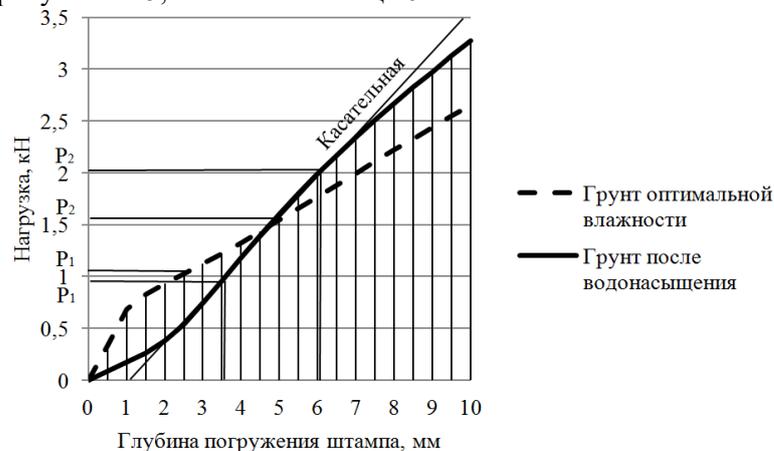


Рис. 2. Результаты испытаний грунта на определение индекса непосредственной несущей способности (IPI) и Калифорнийского числа (CBR) (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Results of soil tests to determine the immediate bearing capacity index (IPI) and California bearing ratio (CBR) (illustration by the authors)

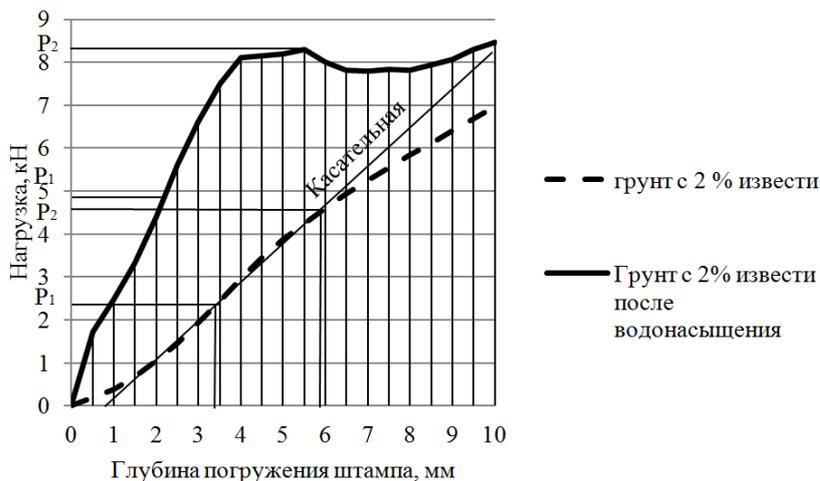


Рис. 3. Результаты испытаний грунта с известью 2% на определение индекса непосредственной несущей способности (ИП) и Калифорнийского числа (СБР) (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Testing results of soil with 2% lime to determine the immediate bearing capacity index (IPI) and California bearing ratio (CBR) (illustration by the authors)

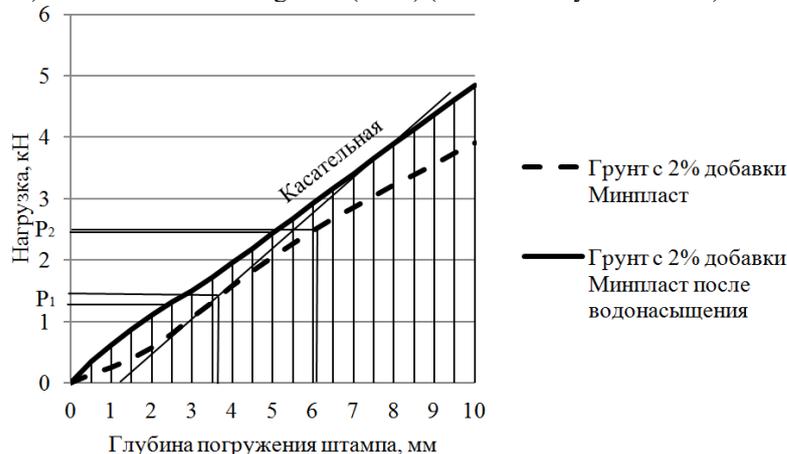


Рис. 4. Результаты испытаний грунта с Минпластом 2% на определение индекса непосредственной несущей способности (ИП) и Калифорнийского числа (СБР) (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Testing results of soil with 2% Minplast to determine the immediate bearing capacity index (IPI) and California bearing ratio (CBR) (illustration by the authors)

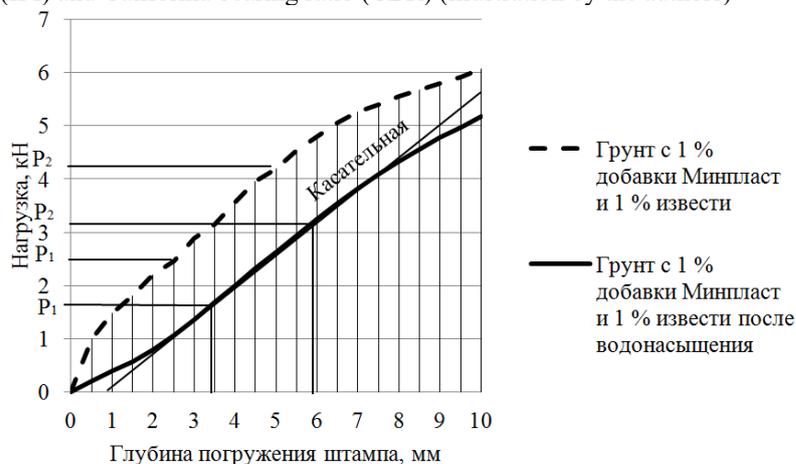


Рис. 5. Результаты испытаний грунта с известью 1% и Минпластом 1% на определение индекса непосредственной несущей способности (ИП) и Калифорнийского числа (СБР) (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Testing results of soil with 1% lime and 1% Minplast to determine the immediate bearing capacity index (IPI) and California bearing ratio (CBR) (illustration by the authors)

Индекс непосредственной несущей способности рассчитывается по формулам:

$$IPI = \frac{P_1}{13,2} \cdot 100, \quad (1)$$

$$IPI = \frac{P_2}{20,0} \cdot 100, \quad (2)$$

где P_1 – значения усилий при погружении плунжера (штампа) на 2,5 мм, кН; P_2 – значения усилий при погружении плунжера на 5,0 мм, кН; 13,2 и 20,0 – значения стандартных усилий (при погружении плунжера (штампа) на глубину 2,5 и 5,0 мм соответственно), кН. Аналогично проводится расчет Калифорнийского числа (формулы 3 и 4). Результаты расчетов приведены в таблице 6.

$$CBR = \frac{P_1}{13.2} \cdot 100 \quad (3)$$

$$CBR = \frac{P_2}{20.0} \cdot 100 \quad (4)$$

Таблица 6

Результаты испытаний индекса несущей способности грунта и калифорнийского числа

№ п/п	Состав	Материал оптимальной влажности			Материал в водонасыщенном состоянии		
		P_1	P_2	IPI	P_1	P_2	CBR
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Грунт суглинок	1,02	1,52	0,08	0,78	2,02	0,1
2	Грунт + известь 2%	2,32	4,52	0,22	4,82	8,25	0,4
3	Грунт + минеральная добавка 2%	1,25	2,42	0,121	1,32	2,44	0,12
4	Грунт + минеральная добавка 1% + известь 1%	2,64	4,2	0,21	1,64	3,16	0,16

Из представленных графиков видно, что по мере увеличения нагрузки наблюдается рост деформации.

На графиках рост индекса несущей способности носит нормальный характер, но на некоторых графиках начало кривой вогнуто вниз. Чтобы нивелировать это, проводили корректировку расположения точки начала отсчета путем построения касательной с максимальным количеством точек соприкосновения с кривой. Для грунта с добавкой 1% извести и шлака кривая носит нормальный характер. Аналогично корректировка проводилась для определения данных калифорнийского числа CBR для образцов, содержащих по 1% извести и шлака, а так же для образцов грунта, не содержащих минеральных добавок. Для образцов содержащих до 2% шлака или извести кривая деформации носит нормальный характер.

По результатам испытаний установлено, что наименьшим индексом несущей способности обладает чистый грунт. Стабилизация грунта известью позволяет повысить несущую способность грунта с 0,08 до 0,22 кН. При модификации добавкой «Минпласт», несущая способность возрастает до 0,121 кН. Совместное применение извести и позволяет достичь индекса несущей способности 0,21 кН.

Что касается калифорнийского числа CBR, то наибольший показатель наблюдается у грунта, модифицированного известью – 0,4. Модификация шлаком дает незначительное увеличение с 0,1 до 0,12, а при добавлении в шлак извести показатель калифорнийского числа равен 0,16.

Для более глубокого изучения влияния минеральной добавки Минпласт на физико-механические характеристики грунтов, дополнительно были проведены испытания пластичной песчаной супеси и суглинка. Результаты представлены в таблице 7 и 8.

Таблица 7

Результаты испытания пластичной песчаной супеси

Показатели	Без добавки	С добавлением 2% Минпласт
Оптимальная влажность, д.е.	0,165	0,16
Максимальная плотность грунта при оптимальной влажности, г/см ³	1,96	2,05
Максимальная плотность сухого грунта при оптимальной влажности, г/см ³	1,69	1,77
Одометрический модуль деформации прир. влажн., МПа	5,9	10
Одометрический модуль деформ. при водонасыщении, МПа	5,7	9,8
Коэффициент просадочности	0,0012	0,0004
Угол внутреннего трения, град	35	37
Сцепление, МПа	0	7

Таблица 8

Результаты испытания грунта суглинка

Показатели	Без добавки	С добавлением 2% Минпласт
Оптимальная влажность, д.е.	0,191	0,19
Максимальная плотность грунта при оптимальной влажности, г/см ³	2,07	2,12
Максимальная плотность сухого грунта при оптимальной влажности, г/см ³	1,72	1,78
Одометрический модуль деформации прир. влажн., МПа	5,95	7,35
Касательный одометрический модуль деформации прир. влажн., МПа	0,85	1,89
Угол внутреннего трения, град	17,74	25,66
Сцепление, МПа	0,04	0,05

Установлено, что добавление активной минеральной добавки «Минпласт» повышает плотность грунта, а также его механические характеристики. В обоих случаях возрастает модуль упругости грунта, увеличивается угол внутреннего трения грунта у суглинка почти на 8, а у супеси только на 2 градуса. В то же время у супеси с введением минеральной добавки наблюдается значительное увеличение показателя сцепления грунта, в то время как у суглинка он увеличивается не значительно. Полученные данные коррелируют с работой авторов [20], которые увеличили прочность слабого глинистого грунта до марки М60 путем добавления гранулированного доменного шлака фракцией до 5 мм.

Стоит отметить, что применение рассмотренной в работе активной минеральной добавки целесообразно в грунтах с низкой влажностью, поскольку протекающие в этом случае химические реакции не сопровождаются выделением тепла. В случае если грунт обводнен, и имеет высокую влажность, следует использовать известь, которая при взаимодействии с водой дает ярко выраженную экзотермическую реакцию.

4. Заключение

Изучен процесс стабилизации грунта известью и активной минеральной добавкой «Минпласт». Установлено, что модифицирование грунта известью позволяет повысить его несущую способность с 0,08 до 0,22 кН. При добавлении только минеральной добавки наблюдается меньшее увеличение данного показателя – 0,121 кН. Совместное применение извести с минеральной добавкой позволяет повысить несущую способность грунта до 0,21 кН.

Что касается калифорнийского числа CBR, то наибольший показатель наблюдается у грунта, модифицированного известью – 0,4. Модификация шлаком дает незначительное

увеличение с 0,1 до 0,12, а при добавлении в шлак извести показатель калифорнийского числа равен 0,16.

Установлено, что введение минеральной добавки «Минпласт» в грунт, в количестве 2 %, позволяет повысить плотность и модуль упругости как супеси, так и суглинка. Кроме того, наблюдается значительное увеличение показателя сцепления при стабилизации пластичной песчаной супеси, в то время как в суглинке он практически остается неизменным. А угол внутреннего трения, наоборот, в значительной степени возрастает у суглинка, а у супеси он не меняется.

Список литературы / References

1. Абросенкова В.Ф. Логгинов Г.И. Ребиндер П.А. Связывание извести в гидросиликат кальция при нормальных условиях. Доклады АН СССР, т.115, № 3, М., Издательство АН СССР 1957.
Abrosenkova V.F. Logginov G.I. Rebinder P.A. Binding of lime into calcium hydroxide silicate under normal conditions. Reports of the USSR Academy of Sciences, vol. 115, № 3, М., Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1957.
2. Егоров И.В. К вопросу о методике изготовления и испытания образцов из стабилизированного грунта. Труды ЛКВВИА им. А.Ф.Можайского, вып. 305. Издание академии, Л., 1959.
Egorov I.V. On the question of the methodology for manufacturing and testing samples from stabilized soil. Proceedings of LKVVIA named after A.F. Mozhaisky, vol. 305. Academy publication, L., 1959.
3. Патент № 2592588 С1 Российская Федерация, МПК E01C 7/36, E02D 3/12. Состав для стабилизации глинистого грунта и способ создания грунтовых дорог с его использованием : № 2015122867/03 : заявл. 15.06.2015 : опубл. 27.07.2016 / В. В. Зырянов; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук (ИХТТМ СО РАН).
Patent № 2592588 C1 Russian Federation, IPC E01C 7/36, E02D 3/12. Composition for stabilizing clay soil and a method for creating dirt roads using it: № 2015122867/03: application. 15.06.2015: publ. 07.27.2016 / V.V. Zyryanov; applicant Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICHTM SB RAS).
4. Патент № 2281356 С1 Российская Федерация, МПК E01C 7/36, E02D 3/12. Состав для стабилизации грунта и способ его использования в дорожном строительстве: № 2005102664/03: заявл. 03.02.2005: опубл. 10.08.2006 / А. Ю. Буваев, С. Ю. Проворнов, С. И. Тараненко; заявитель Открытое общество с ограниченной ответственностью (ООО) "Белтекс".
Patent No. 2281356 C1 Russian Federation, IPC E01C 7/36, E02D 3/12. Composition for soil stabilization and method of its use in road construction: No. 2005102664/03: application. 02/03/2005: publ. 08/10/2006 / A. Yu. Buvaev, S. Yu. Provornov, S. I. Taranenko; applicant Open Limited Liability Company (LLC) «Beltex».
5. Печенцов, И. М. Переработка отходов металлургической промышленности для стабилизации и укрепления проблемных грунтов / И. М. Печенцов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2023. – Т. 20, № 4. – С. 811-819. – DOI 10.20295/1815-588X-2023-4-811-819.
Pechentsov, I.M. Processing waste from the metallurgical industry for stabilization and strengthening of problematic soils / I.M. Pechentsov // News of the Petersburg University of Railway Transport. – 2023. – V. 20, No. 4. – P. 811-819. – DOI 10.20295/1815-588X-2023-4-811-819.
6. Maarten van der Zee, Martin Zijlstra, Lambertus J. Kuijpers, Marieke Hilhorst, Karin Molenveld, Wouter Post. The effect of biodegradable polymer blending on the disintegration rate of PHBV, PBS and PLA in soil / Polymer Testing, Volume 140, 2024, 108601, ISSN 0142-9418, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108601>.

7. Thanon Bualuang, Peerapong Jitsangiam, Korakod Nusit, Ubolluk Rattanasak, Prinya Chindaprasirt. Enhancing lateritic soil for sustainable pavement subbase with polymer-modified cement: A comparative study of styrene butadiene rubber and styrene acrylic latex applications / *Case Studies in Construction Materials*, Volume 21, 2024, e03760, ISSN 2214-5095, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03760>.
8. Irem Bozyigit, Hande Ozenc Zingil, Selim Altun. Performance of eco-friendly polymers for soil stabilization and their resistance to freeze–thaw action / *Construction and Building Materials*, Volume 379, 2023, 131133, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131133>.
9. Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Выборнов Д.Р. Повышение свойств цементогрунтов в слоях дорожных одежд модификацией пластификатором // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*, 2024, № 4, – С.98-103, ISSN: 1814-3296, eISSN: 2519-2817
Vdovin E.A., Bulanov P.E., Vybornov D.R. Improving the properties of cement soils in the layers of road pavement by modification with a plasticizer // 2024, №4 - P.98-103. ISSN: 1814-3296, eISSN: 2519-2817.
10. Аль-Екаби, Х. Х. А. Применение армоэлементов из переработанного дробленого бетона для стабилизации водонасыщенных илисто-глинистых грунтов / Х. Х. А. Аль-Екаби, А. Ю. Прокопов // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле.* – 2023. – № 3. – С. 125-136.
Al-Ekabi, Kh. Kh. A. Application of reinforced elements from recycled crushed concrete for stabilization of water-saturated silt-clay soils / Kh. Kh. A. Al-Ekabi, A. Yu. Prokopov // *News of Tula State University. Geosciences.* – 2023. – No. 3. – P. 125-136.
11. Jianli Jia, Linying Yao, Bing Xiao, Xiaolu Fan, Xinzi Wang, Yunpeng Liu, Yu Wu, Lei Hu, Dayi Zhang. Mechanisms and influential factors of soil chromium long-term stability by an accelerated aging system after chemical stabilization / *Journal of Hazardous Materials*, Volume 476, 2024, 134994, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134994>.
12. Ligia A. Martins, António A.S. Correia, Paulo J. Venda Oliveira, Luis J.L. Lemos. Effect of the cyclic loading on the yield surface of a chemically stabilised soil / *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 2024, ISSN 1755-0750, <https://doi.org/10.1680/jgrim.24.00036>.
13. Патент на полезную модель № 134953 U1 Российская Федерация, МПК E02D 17/20, E01C 9/00. структура раздвижной гибкой трехмерной решетки для стабилизации грунта : № 2013122592/03 : заявл. 16.05.2013 : опубл. 27.11.2013 / С. С. Мельникова, Б. Г. Денисов, В. Л. Капустин.
Utility model patent № 134953 U1 Russian Federation, IPC E02D 17/20, E01C 9/00. structure of a sliding flexible three-dimensional grid for soil stabilization: No. 2013122592/03: application. 05/16/2013: publ. 11/27/2013 / S. S. Melnikova, B. G. Denisov, V. L. Kapustin.
14. Мануковский А. Ю., Курдюков Д. П., Курдюков Р. П., Сидоров В. Д. Усовершенствование технологии стабилизации переувлажненных грунтов с применением инновационных стабилизирующих добавок в вяжущие // *Перспективные ресурсосберегающие технологии развития лесопромышленного комплекса : Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Воронеж, 29 сентября 2023 года.* – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2023. – С. 236-239. – DOI 10.58168/R-STDTIC2023_236-239.
Manukovsky A. Yu., Kurdyukov D. P., Kurdyukov R. P., Sidorov V. D. Improving the technology for stabilizing waterlogged soils using innovative stabilizing additives in binders // *Prospective resource-saving technologies for the development of the timber industry: Materials of the International Scientific and Practical conference of young scientists and students, Voronezh, September 29, 2023.* – Voronezh: Voronezh State Forestry University named after. G.F. Morozova, 2023. – P. 236-239. – DOI 10.58168/R-STDTIC2023_236-239.

15. Бобешко А. А., Гавриш В.В., Гуторин Е.В. Стабилизация грунтов основания при строительстве автомобильных дорог с применением технологии «KINPRO nano – System» // Техника и технологии: пути инновационного развития : материалы II-ой международной научно-практической конференции, Курск, 29 июня 2012 года / ответственный редактор: А.А. Горохов. – Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2012. – С. 54-56.
Bobeshko A. A., Gavrish V. V., Gutorin E. V. Stabilization of subgrade soils during the construction of highways using the «KINPRO nano – System» technology // Equipment and technologies: ways of innovative development: materials of the II international scientific and practical conference, Kursk, June 29, 2012 / executive editor: A.A. Gorokhov. – Kursk: Closed Joint Stock Company «University Book», 2012. – P. 54-56.
16. Шилин И. В., Химченко А.В. О возможности использования технологии стабилизации грунта водной смесью концентрата Perma-Zyme для дорожного строительства // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2023. – № 1(159). – С. 46-51.
Shilin I.V., Khimchenko A.V. On the possibility of using soil stabilization technology with an aqueous mixture of Perma-Zyme concentrate for road construction // Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture. – 2023. – No. 1(159). – P. 46-51.
17. Ремнев В. В. Стабилизация грунтов смесями на основе шлакощелочных вяжущих при фрезерно-инъекционной технологии // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году : Сборник научных трудов РААСН: в 2 томах / Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН). Том 2. – Москва : Издательство АСВ, 2021. – С. 227-230.
Remnev V.V. Stabilization of soils with mixtures based on slag-alkaline binders using milling-injection technology // Fundamental, search and applied research of the RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2020: Collection scientific works of RAASN: in 2 volumes / Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAASN). Volume 2. – Moscow: ASV Publishing House, 2021. – P. 227-230.
18. Фролова И. П., Горчакова А.П. Технология стабилизации и укрепление грунта. Преимущества их применения // Логистика - евразийский мост: Материалы XVIII Международной научно-практической конференции, Красноярск, 27–30 апреля 2023 года. Том Часть 2. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2023. – С. 299-302.
Frolova I. P., Gorchakova A. P. Technology of stabilization and strengthening of soil. Advantages of their use // Logistics - Eurasian Bridge: Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference, Krasnoyarsk, April 27–30, 2023. Volume Part 2. – Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University, 2023. – P. 299-302.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023610069 Российская Федерация. Программная модель процесса управления элементами устройства для стабилизации мерзлого грунта: № 2022686017: заявл. 23.12.2022: опубл. 09.01.2023 / Н. Ю. Клиндух, А. С. Климов, Т. А. Шилкина, С. В. Шилкин; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».
Certificate of state registration of a computer program No. 2023610069 Russian Federation. Software model of the process of controlling the elements of a device for stabilizing frozen soil: No. 2022686017: application. 12/23/2022: publ. 01/09/2023 / N. Yu. Klindukh, A. S. Klimov, T. A. Shilkina, S. V. Shilkin; applicant Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY».
20. Соловьева В. Я., Степанова И. В., Соловьев Д. В. Утилизация и эффективное использование отходов металлургического производства в качестве реакционно-

активного компонента при укреплении проблемных глинистых грунтов // Геоэкохимия защиты литосферы : Материалы VIII Международной научно-практической интернет-конференции, Москва, 01–03 июня 2022 года. – Москва: ООО «Издательство «Спутник+», 2022. – С. 18-20.

Solovieva V. Ya., Stepanova I. V., Soloviov D. V. Disposal and efficient use of metallurgical production waste as a reactive component in strengthening problem clay soils // Geoecochemistry of lithosphere protection: Proceedings of the VIII International scientific and practical Internet conference, Moscow, June 01–03, 2022. – Moscow: ООО «Izdatelstvo «Sputnik +», 2022. – P. 18-20.

Информация об авторах

Шагинурова Гузель Фазыловна, Инженер ПТО Мамадышского филиала АО «Татавтодор», г. Казань, Российская Федерация

E-mail: Latipova.Guzel@mmd.tatavtodor.ru

Смирнов Денис Сергеевич, доцент, кандидат технических наук, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: denis27111974@yandex.ru, ORCID: 0009-0004-8621-1630

Шарифуллин Марсель Талгатович, директор ООО «УК Профи», г. Казань, Российская Федерация

E-mail: ukprofi.ooo@bk.ru

Information about the authors

Guzel F. Shaginurova, Engineer of the PTO Mamadysh branch JSC Tatavtodor, Kazan, Russian Federation

E-mail: Latipova.Guzel@mmd.tatavtodor.ru

Denis Se. Smirnov, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

E-mail: denis27111974@yandex.ru, ORCID: 0009-0004-8621-1630

Marsel T. Sharifullin, Director of UK Profi LLC, Kazan, Russian Federation

E-mail: ukprofi.ooo@bk.ru