

2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

УДК 630.381.2

О.В. Зубова, В.В. Силецкий

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЩЕЛОЧНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ НА ШЛАМОГРУНТОВЫЕ СМЕСИ

Введение. Экология является основной составляющей развития современного производства. Данное направление критически важно в том числе в лесозаготовительном комплексе, начиная от лесосечных работ, заканчивая вывозкой и лесовосстановлением на выделенной территории. Основные требования к охране природы в лесном дорожном строительстве прописаны в нормативных документах¹.

Проектирование лесных дорог в сравнении с дорогами общего пользования является более сложной задачей. Это связано с тем, что лесная дорога должна обладать высокими физико-механическими характеристиками, быть экологичной и при этом иметь минимальную стоимость.

Наиболее весомой проблемой при рассмотрении проекта дороги является правильный подбор материалов для строительства. В современном мире открыт широкий спектр материалов. Однако инженер-проектировщик сталкивается с проблемами экономического характера, так как большинство лесных дорог в основном эксплуатируется в течение нескольких лет – время заготовки и вывозки, но при этом должны обладать высокими прочностными характеристиками в связи с динамическими нагрузками лесовозов.

Одним из актуальных направлений решения данных задач, связанных с экологической составляющей, а также физико-механической прочностью и экономичностью, является использование различных отходов промышленности в смесях с местными грунтами. Примером таких отходов является нефелиновый шлам. Была проведена большая работа по исследованию данного материала на кафедре промышленного транспорта СПбГЛТУ [Зу-

¹ СП 318.1325800.2017 «Дороги лесные. Правила эксплуатации».

бова, Силецкий и др., 2018; Бессараб, Суворова и др., 2014], а также советскими и российскими учеными [Безрук, 1971; Колбас, 1978; Шепелев, Ескова и др., 2019].

Как показывают ранее проведенные исследования [Лысянников и др., 2017], нефелиновый шлам является медленно твердеющим минеральным вяжущим. Повышение скорости твердения и набора прочности является одной из основных задач настоящего исследования. Добиться поставленной задачи возможно с помощью каталитических добавок, таких как цемент, известь, щелочи и т. д. Каждый из методов имеет свои недостатки и преимущества. Наиболее значительным недостатком использования извести и цемента является экологическая составляющая [Мео, 2014]. В связи с этим от методик укрепления, основанных на извести и цементе, как правило, отказываются в пользу альтернативных, более экологичных методов укрепления грунтов. Одним из наиболее перспективных методов является использование щелочей в малых дозировках в виде катализаторов. Также щелочи эффективно снижают кислотность грунтов местного залегания, что положительно сказывается на процессе структурообразования [Зубова, Силецкий, 2021].

При строительстве лесных дорог задействованы значительные объемы грунтов. Даже при малых дозировках щелочей в смеси потребуются значительное количество катализаторов. На сегодняшний день наиболее распространенными щелочами в мире являются NaOH и KOH . Производимые объемы щелочей достаточно велики в нашей стране, что не вызовет дефицита и затруднений с поставками при глобальных проектах.

Было запланировано поисковое исследование по нахождению оптимального катализатора среди щелочей. Подбор дозировок смеси был основан на ранее полученных результатах в данном направлении [Зубова, Силецкий и др., 2019].

Цель: Определение наиболее эффективной щелочи при укреплении дорожно-строительного материала на основе нефелинового шлама.

Задачи:

1. Исследовать эффективность применения щелочей NaOH и KOH в качестве катализаторов.
2. Провести поисковое исследование для определения наиболее высоких физико-механических характеристик материала.
3. Изложить рекомендации по применению шламогрунтов, укрепленных щелочью.

Материалы и методика исследования. Изготовление образцов производится по стандартной методике ГОСТ 12248–2010², за исключением введения щелочей. Щелочь добавляется в предварительно рассчитанный объем воды для оптимальной влажности, после чего смесь равномерно смешивается. Равномерное распределение щелочи по всей смеси является важным аспектом, в случае несоблюдения данного фактора физико-механические, а также физико-химические характеристики дорожно-строительного материала могут быть значительно снижены, что приведет к его разрушению под высокими динамическими нагрузками. Далее смесь укладывается в формы диаметром 3,5 см и высотой 3,5 см, формирование образца происходит под давлением 100 кг/см², в течение 3 минут. Образцы хранятся в воздушно-влажной среде на протяжении 1, 7, 14, 21, 28, 90 сут. Испытание образцов проводится по стандартной методике ГОСТ 23558–94³.

Водные растворы гидроксида натрия и гидроксида калия имеют высокую щелочную среду $\text{pH} = 13\text{--}13,5$ и $\text{pH} = 12\text{--}12,5$ соответственно. Оба раствора достаточно эффективно нейтрализуют кислую среду [Лакиенко, Юруткина и др., 2021]. Кислая среда в шламогрунтовой смеси обусловлена грунтами местного залегания [Королев, Нестеров, 2017]. Структурообразование в кислой среде протекает с заметным снижением скорости, а также потерей прочностных характеристик. В связи с этим процентное содержание щелочи увеличивается пропорционально увеличению процентного содержания грунта в смеси.

Обе щелочи в процессе химических реакций высвобождают положительно заряженные частицы – катионы. Высвобожденные катионы активно вступают в реакции с различными компонентами нефелинового шлама, тем самым предположительно увеличивая скорость твердения и прочностные характеристики альтернативного дорожно-строительного материала.

В роли минерального вяжущего в смеси выступает рядовой нефелиновый шлам. Предварительно шлам просушивается, проводится определение гранулометрического состава по ГОСТ 12536–2014⁴. В исследовании используется шлам с диаметром частиц от 10 до 30 мм.

² ГОСТ 12248–2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

³ ГОСТ 23558–94. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия.

⁴ ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.

Заполнителем выступает грунт с повышенной кислотностью среды pH – суглинок легкий. Грунт предварительно просушивается, по аналогии с шламом проводится определение гранулометрического состава в соответствии с ГОСТ 12536–2014.

Для наглядности и подтверждения положительного влияния щелочей была сделана серия образцов без использования щелочных катализаторов в той же пропорции основных компонентов и добавлении цемента в смесь в малых дозировках с целью ускорения процессов структурообразования.



Рис. 1. Шламогрунтовые образцы укрепленные щелочью:
а – гидроксид калия, б – гидроксид натрия

Fig. 1. Sludge-ground samples reinforced with alkali:
a – potassium hydroxide, b – sodium hydroxide

На рис. 1 представлены шламогрунтовые образцы, укрепленные гидроксидом калия и гидроксидом натрия. Полученные образцы имеют монолитную структуру, что может косвенно свидетельствовать о низком водопоглощении полученного материала.

Результаты исследования. Результаты проведенного эксперимента представлены в таблице. Для подтверждения однородности экспериментальных данных и исключения случайных ошибок были проведены 3 серии параллельных опытов. Расчетная ошибка представленных данных находится в пределах 5%.

Результаты проведенного исследования графически представлены на рис. 2 и 3. Приведены уравнения регрессии, а также коэффициент детерминации. Коэффициент детерминации в представленных моделях $>0,95$, что свидетельствует о приемлемости представленных результатов.

**Результаты исследования взаимодействия щелочи
и шламогрунтовой смеси**

Results of the study of the interaction of alkali and slurry mixture

№	Состав смеси				Прочность R _{сж} , МПа	Водопоглощение W, %	Продолжительность структурообразования сутки
	НФШ	Грунт	Щелочь	Цемент			
1	50	50	1Na	–	2,10	3,92	7
2	50	50	1K	–	1,50	3,75	7
3	50	50	–	2%	1,10	7,12	7
4	50	50	1Na	–	2,40	3,61	14
5	50	50	1K	–	1,70	3,21	14
6	50	50	–	2%	1,15	8,45	14
7	50	50	1Na	–	2,60	3,12	21
8	50	50	1K	–	2,20	2,50	21
9	50	50	–	2%	1,20	10,00	21
10	50	50	1Na	–	2,90	2,89	28
11	50	50	1K	–	2,40	2,41	28
12	50	50	–	2%	1,30	12,65	28
13	50	50	1Na	–	3,70	2,80	90
14	50	50	1K	–	3,10	1,89	90
15	50	50	–	2%	1,90	13,15	90

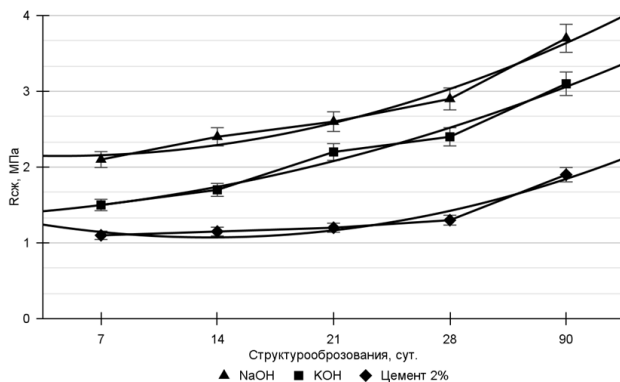


Рис. 2. График зависимости прочности шламогрунтовых образцов укрепленных щелочами от времени структурообразования

Fig. 2. Graph of the dependence of the strength of sludge-ground formations reinforced with alkalis on the time of structure formation

Уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$\text{NaOH: } R_{\text{сж}} = 0,0786x^2 + 0,0557x + 2,16; \quad R^2 = 0,975;$$

$$\text{KOH: } R_{\text{сж}} = 0,05x^2 + 0,19x + 1,5; \quad R^2 = 0,98;$$

$$\text{Цемент: } R_{\text{сж}} = 0,0857x^2 + 0,0629x - 1,13; \quad R^2 = 0,977.$$

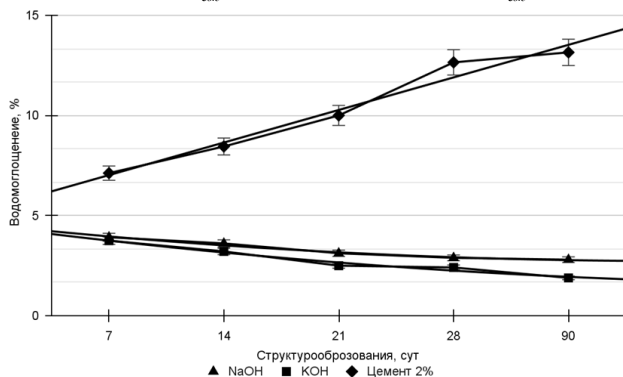


Рис. 3. График зависимости водопоглощения шламогрунтовых образцов укрепленных щелочами от времени структурообразования

Fig. 3. Graph of the dependence of the water absorption of sludge-ground formations reinforced with alkalis on the time of structure formation

Уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$\text{NaOH: } W = 0,05x^2 + 0,496x - 3,96; \quad R^2 = 0,984;$$

$$\text{KOH: } W = 0,0471x^2 + 0,641x - 3,75; \quad R^2 = 0,974;$$

$$\text{Цемент: } W = 0,52x + 3,05; \quad R^2 = 0,992.$$

Из графиков видно, что предел прочности при сжатии и водопоглощение у образцов:

- обработанных минеральным вяжущим – цементом, прочность при сжатии от 1,10 до 1,90 МПа, водопоглощение от 7,12 до 13,15%.
- обработанных щелочью – КОН, прочность при сжатии от 1,50 до 3,10 МПа, водопоглощение от 1,89 до 3,75%.
- обработанных щелочью – NaOH, прочность при сжатии от 2,10 до 3,70 МПа, водопоглощение от 2,80 до 3,92%.

Добавки в исследовании применялись в минимальных дозировках, при необходимости повышения прочности, возможно повышение дозировок катализаторов. В данном исследовании наглядно видно, значительное преимущество щелочи перед традиционным минеральным вяжущим – цементом в качестве катализатора. Структурообразование во времени протекает с большей скоростью на начальных этапах, что обосновывает теорию о негативном воздействии кислой среды на процессы структурообразования и необходимости добавок катализаторов в смеси шламогрунта. В длительном интервале прочность достаточно активно нарастает и при добавлении цемента, это фактор описывался в ранее представленных исследованиях. Таким образом, подтверждается, что нефелиновый шлам является медленно твердеющим минеральным вяжущим, эксплуатационную прочность он набирает в течение длительного времени без добавок. Все полученные материалы соответствуют маркам прочности по ГОСТ 23558–94 и могут использоваться как в земляном полотне, так и с ограничениями в слоях покрытия лесных дорог.

Образцы, обработанные цементом, обладают более высоким водопоглощением, при этом из рис. 3 видно, что показатели повышаются с увеличением срока структурообразования, предположительно, это связано образованием ячеистой структуры материала. При использовании щелочей, водопоглощение значительно ниже, а также во времени показатель снижается, что связано с образованием монолитной структуры материала. Все выборки соответствуют ГОСТ 23558–94. Низкое водопоглощение, полученное при обработке щелочами, косвенно свидетельствует о повышенной морозостойкости материала.

Заключение. Проведенное поисковое исследование показало, что при идентичных дозировках медленно твердеющего вяжущего – нефелинового шлама, грунтов местного залегания и катализатора – в виде щелочей и цемента, более высокие показатели имеет смесь с использованием NaOH.

Высокая щелочная среда NaOH эффективно нейтрализует кислотную среду, а также более благоприятна для процессов структурообразования шламогрунтовой смеси. На данном этапе исследования не полным объемом рассмотрено воздействие катионов Na, предположительно они способствуют повышению прочности структуры материала.

При выборе смеси необходимо руководствоваться как эксплуатационными, так и экономическими, географическими и экологическими аспектами. При больших динамических нагрузках и невысоких требованиях к морозостойкости материала целесообразно использовать щелочи NaOH. Низкие температуры и малая интенсивность движения предполагают применение щелочи KOH. При необходимости и отсутствии щелочей допустимо применять цементные добавки; этот метод менее экологичный и экономичный, как показывают исследования, позволяет достичь проектной прочности, но при этом является нерентабельным.

Библиографический список

Безрук В.М. Укрепление грунтов в дорожном и аэродромном строительстве. М.: Транспорт, 1971. 246 с.

Бессараб Г.А., Суворова Н.А., Просеков С.А., Краснов Р.В., Елисеев А.А. Улучшение свойств дорожно-строительного материала из смеси гранитного отсева и нефелинового шлама, с изменением его дробления // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: матер. Междунар. науч. конф. Вологда: ВГТУ, 2014. № 1. С. 20–23.

Зубова О.В., Силецкий В.В. Исследование процесса структурообразования материала из смеси нефелинового шлама и щебня с добавлением цемента // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 235. С. 179–186. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.235.179-186.

Зубова О.В., Силецкий В.В., Козлов А.П., Кузнецов К.В. Исследования дорож смесей на основе грунтов лесной зоны и нефелинового шлама с добавками минеральных вяжущих // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 223. С. 187–200. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.223.187-200.

Зубова О.В., Силецкий В.В., Куканов С.Ю., Коваленко Т.В. Increase sludge-ground and ash-ground mixtures crystal lattice strength by lowering the pH environment // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. 316 12085. DOI: 10.1088/1755-1315/316/1/012085.

Колбас Н.С. Вопросы теории комплексного укрепления грунтов вяжущими материалами с применением лесохимических реагентов и отходов промышленности. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. 184 с.

Королев В.А., Нестеров Д.С. Физико-химические закономерности изменения электрических зарядов частиц глинистых грунтов // Инженерная геология. 2017. №. 4. С. 50–60.

Лакиенко А.Ю., Юруткина, И.А., Каныгина, О.Н., Кушнарева О.П. Изменение зарядов на поверхности частиц глинистых минералов при вариации внутренних и внешних условий // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: матер. Всерос. науч.-метод. конф. (с междунар. участием). Оренбург, 2021. С. 2748.

Лысянников А.В., Третьякова Е.А., Лысянникова Н.Н. Строительство дорожных покрытий из вторичного сырья // Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы: матер. Междунар. науч.-практ. конф., Новокузнецк, 07–08 декабря 2017 / отв. ред. Э.И. Забнева; ред. кол. Л.С. Кочкина и др. Ульяновск: Зебра, 2017. С. 78–81.

Шепелев И. И., Ескова Е. Н., Потапова С. О., Немеров А. М., Бочков Н.Н. Ecological engineering in the construction and exploitation of roads with technogenic materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. May. Vol. 537, no. 6. P. 062067. IOP Publishing.

Meo S.A. Health hazards of cement dust // Saudi Med. J. 2014. No. 25(9). P. 1153–1159.

References

Bessarab G.A., Suvorova N.A., Prosekov S.A., Krasnov R.V., Eliseev A.A. Improving the properties of road-building material from a mixture of granite screening and nepheline sludge, with a change in its crushing. *Actual problems of the development of the forest complex* : mater. International Scientific Conf. Vologda: VSTU, 2014, no. 1, pp. 20–23. (In Russ.)

Bezruk V.M. Soil strengthening in road and airfield construction. M.: Transport, 1971. 246 p. (In Russ.)

Kolbas N.S. Questions of the theory of complex strengthening of soils with binding materials with the use of forest chemical reagents and industrial waste. L.: Publishing House of the Leningrad University, 1978. 184 p. (In Russ.)

Korolev V.A., Nesterov D.S. Physico-chemical patterns of changes in electric charges of clay soil particles. *Engineering geology*, 2017, no. 4, pp. 50–60. (In Russ.)

Lakienko A. Y., Yurutkina, I. A., Kanygina, O. N., Kushnareva O. P. Change of charges on the surface of clay mineral particles under variations of internal and external conditions. *The University complex as a regional center of education, science and culture*: mater. of the All-Russian Scientific and Methodological Conference (with international participation). Orenburg, 2021, p. 2748. (In Russ.)

Lysyannikov A.V., Tretyakova E.A., Lysyannikova N.N. Construction of road surfaces from secondary raw materials. *Issues of Modern Science: Problems, Trends*

and prospects: mater. of the International Scientific and Practical Conference, Novokuznetsk, December 07-08, 2017 / ed. by E.I. Zabneva; ed. by Col. L.S. Kochkin [et al.]. Ulyanovsk: Zebra, 2017, pp. 78–81. (In Russ.)

Meo S.A. Health hazards of cement dust. Saudi Med. J., 2014, no. 25(9), pp. 1153–1159.

Shepelev I.I., Eskova E.N., Potapova S.O., Nemerov A.M., & Bochkov N.N. Ecological engineering in the construction and exploitation of roads with technogenic materials. IOP Conference Series: mater. Science and Engineering, 2019, May, vol. 537, no. 6, p. 062067. IOP Publishing.

Zubova O.V., Siletsky V.V. Investigation of the process of structure formation of a material from a mixture of nepheline sludge and crushed stone with the addition of cement. Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy, 2021, iss. 235, pp. 179–186. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.235.179-186. (In Russ.)

Zubova O.V., Siletsky V.V., Kozlov A.P., Kuznetsov K.V. Studies of road mixtures based on forest zone soils and nepheline sludge with additives of mineral binders. Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoj Akademii, 2018, iss. 223, pp. 187–200. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.223.187-200. (In Russ.)

Zubova O.V., Siletsky V.V., Kukanov S.Y., Kovalenko T.V. Increase sludge-ground and ash-ground mixtures crystal lattice strength by lowering the pH environment. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2019, 316 12085. DOI: 10.1088/1755-1315/316/1/012085. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 14.10.2022

Зубова О.В., Силецкий В.В. Воздействие щелочных катализаторов на шламогрунтовые смеси // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 241. С. 173–183. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.173-183

Актуальность вопроса расширения лесной инфраструктуры в Российской Федерации с каждым годом увеличивается и сталкивается с экономическими, экологическими и эксплуатационными проблемами в связи с широкой географией нашей страны. Представленное исследование направлено на комплексное решение описанных проблем. Использование отходов промышленности в смеси с грунтами и щелочными добавками позволит сократить дефицит дорожно-строительных материалов, а утилизация значительных объемов отходов положительно скажется на экологической составляющей. Представленные в исследовании материалы соответствуют ГОСТ по своим физико-механическим характеристикам. Даны первичные рекомендации по применению катализаторов в шламогрунтовых смесях.

Ключевые слова: нефелиновый шлам, шламогрунт, лесные дороги, гидроксид натрия, гидроксид калия, щелочи.

Zubova O.V., Siletskiy V.V. Effect of alkaline catalysts on slurry mixtures. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2022, iss. 241, pp. 173–183 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.173-183

The urgency of the issue of expanding the forest infrastructure in the Russian Federation is increasing every year and faces economic, environmental and operational problems due to the wide geography of our country. The presented research is aimed at a comprehensive solution of the voiced problems. The use of industrial waste mixed with soils and alkaline additives will reduce the shortage of road construction materials, and the disposal of significant amounts of waste will have a positive impact on the environmental component. The materials presented in the study comply with SUST in terms of their physical and mechanical characteristics. Primary recommendations on the use of catalysts in sludge-soil mixtures are given.

Keywords: nepheline sludge, sludge, forest roads, sodium hydroxide, potassium hydroxide, alkalis.

ЗУБОВА Оксана Викторовна – доцент кафедры промышленного транспорта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. WoS ResearcherID: AAE-4427-2020. ScopusAuthorID: 57217966252. ORCID: 0000-0002-6263-4688.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ok_z19@mail.ru

ZUBOVA Oksana V. – PhD (Technical), Associate Professor, St.Petersburg State Forest Technical University. WoS ResearcherID: AAE-4427-2020. ScopusAuthorID: 57217966252 ORCID: 0000-0002-6263-4688.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: ok_z19@mail.ru

СИЛЕЦКИЙ Вадим Витальевич – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ResearcherID: ABD-1334-2020. ScopusAuthorID: 57211205534. ORCID: 0000-0003-3357-533X.

194021 Институтский пер., д.5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: lol.spairo@yandex.ru

SILETSKIY Vadim V. – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University. ResearcherID: ABD-1334-2020. ScopusAuthorID: 57211205534 ORCID: 0000-0003-3357-533X.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: lol.spairo@yandex.ru