

О.В. Зубова, В.В. Силецкий

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ
ЩЕБЕНОЧНОЙ СМЕСИ,
УКРЕПЛЕННОЙ НЕФЕЛИНОВЫМ ШЛАМОМ И ЦЕМЕНТОМ**

Введение. В современных реалиях технологические процессы лесозаготовок, в том числе сегмент транспортировки лесоматериалов и лесного дорожного строительства, претерпевают существенные преобразования. Совершенствование лесовозных автомобилей, заготовительной и погрузочной техники, а также все большая интенсивность движения по дорогам общего пользования приводят к тому, что многоступенчатая вывозка древесины становится все более актуальной. При всех преимуществах такой организации перевозок есть факторы, повышающие затратность процесса, например, необходимость в устройстве лесных терминалов в местах перегрузки древесины. К погрузочным площадкам такого рода достаточно высокие требования по прочности дорожной одежды, так как они испытывают высокие динамические нагрузки как от лесовозной техники, так и от погрузчиков.

Для устройства площадок терминалов рекомендовано применять жесткие дорожные покрытия, преимущественно цементобетонные плиты, а также смеси с высоким содержанием цемента для достижения требуемой прочности. Использование цементобетонных плит имеет ряд сложностей: высокая стоимость плит влечет за собой снижение рентабельности строительства площадки терминала, а технологические недостатки, такие как стыки, смещение плит, их разрушение, приводят к дополнительным расходам на ремонт терминала.

Использование технологии укрепления грунтов основания с помощью больших объемов цемента при строительстве лесопогрузочных пунктов является экономически невыгодным решением как из-за больших объемов требуемого вяжущего, так и в связи с недостаточно высокой прочностью получаемого материала. Высокое содержание глинистых примесей в укрепляемых грунтах пагубно влияет на процесс структурообразования и на прочностные показатели, так как в такой структуре частицы минерального вяжущего связаны друг с другом в местах контакта

сравнительно слабыми молекулярными силами через тончайшие прослойки жидкой среды, это и придает материалу способность к значительным остаточным деформациям. Использование материала с такими показателями на лесных площадках является нецелесообразным, так как при постоянных высоких динамических нагрузках будет образовываться колеиность и воронки в местах передвижения лесовозов и хранения штабелей.

Теоретические предпосылки. Площадку лесопогрузочного терминала необходимо устраивать с жестким покрытием по следующим причинам:

- 1) постоянные высокие динамические нагрузки;
- 2) обеспечение сухих мест, во избежание снижения физико-механических свойств хранимого сырья.

Недостатки традиционно применяемых для строительства площадок терминала цементобетонных плит:

- 1) высокая стоимость;
- 2) технологические недостатки – стыки, смещение плит, их разрушение и т. д.

Альтернативным решением является сплошное покрытие из шламо-щебеночной смеси, укрепленной цементом. Использование сплошного покрытия из исследуемого материала может позволить устранить конструктивный недостаток – стыки в местах примыкания плит, а также позволит значительно упростить технологию строительства и повысить рентабельность путем снижения стоимости на строительные материалы [Безрук и др., 1966; Колбас, 1978; Коновалов и др., 1988; Холохонова, Короткая, 2000].

Методика исследования. При разработке данного вопроса было принято решение провести экспериментально-поисковое исследование с целью нахождения материала с высокими физико-механическими показателями, а также низкой стоимостью для повышения рентабельности проекта по строительству лесопогрузочного пункта. Была выдвинута теория о том, что нефелиновый шлам в смеси с цементом в роли активатора и щебня для армирования материала позволит получить требуемые прочностные показатели, сопоставимые с цементобетонными плитами для строительства лесопогрузочного пункта.

Результаты исследования и обсуждение. Результаты проведенного исследования представлены в таблице и на рис. 1 и 2.

**Результаты исследования взаимодействия компонентов
и структурообразования смеси**

**Results of the study of the interaction of components
and structure formation of the mixture**

№ Образца	Состав смеси, %			Прочность $R_{сж}$, МПа	Водопогло- щение W, %	Продолжительность структурообразо- вания сутки
	НФШ	щебень	цемент			
1	40	60	5	6,80	6,20	28
2	40	60	5	7,50	4,50	90
3	50	50	5	7,10	6,90	28
4	50	50	5	8,10	4,90	90
5	60	40	5	7,90	7,90	28
6	60	40	5	9,20	5,60	90
7	70	30	5	10,20	8,40	28
8	70	30	5	12,40	6,01	90
9	80	20	5	13,50	8,70	28
10	80	20	5	22,60	6,40	90
11	90	10	5	14,60	8,90	28
12	90	10	5	24,70	6,90	90
13	100	0	5	10,10	9,70	28
14	100	0	5	16,50	8,50	90

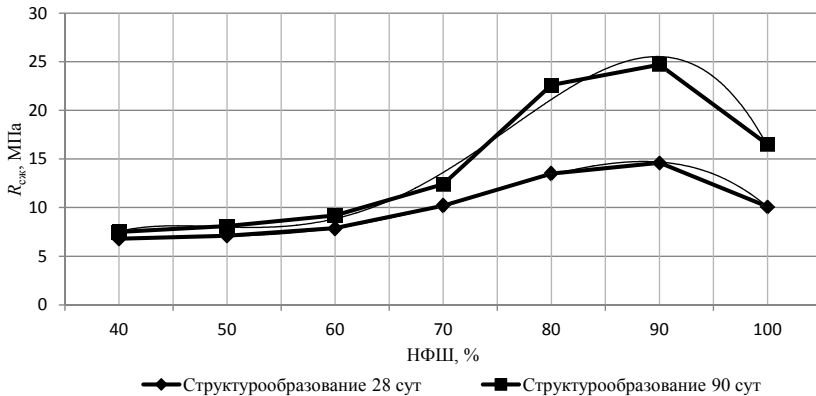


Рис. 1. График зависимости предела прочности при сжатии образцов из смеси НФШ и щебня с введением цемента от времени структурообразования

Fig. 1. Graph of the dependence of the compressive strength of samples from a mixture of nepheline sludge and crushed stone with the introduction of cement on the time of structure formation

Представлены уравнения регрессии для различного времени структурообразования:

при структурообразовании 28 сут уравнение имеет вид:

$$y = -0,0705x^4 + 0,8551x^3 - 3,0667x^2 + 4,5221x + 4,5714; R^2 = 0,9994$$

при структурообразовании 90 сут уравнение имеет вид:

$$y = -0,1947x^4 + 2,5318x^3 - 10,125x^2 + 16,027x - 0,6857; R^2 = 0,9847$$

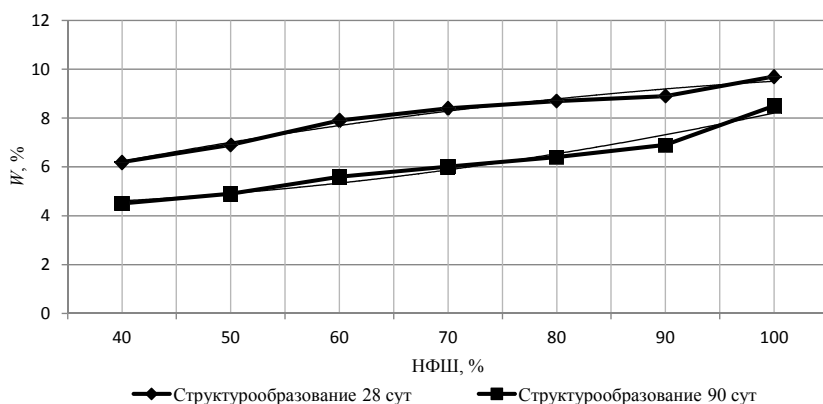


Рис. 2. График зависимости водопоглощения образцов из смеси НФШ и щебня с введением цемента от времени структурообразования

Fig. 2. Graph of the dependence of water absorption of samples from a mixture of nepheline sludge and crushed stone with the introduction of cement on the time of structure formation

Представлены уравнения регрессии для различного времени структурообразования:

при структурообразовании 28 сут уравнение имеет вид:

$$y = -0,0464x^2 + 0,9179x + 5,3571; R^2 = 0,9773$$

при структурообразовании 90 сут уравнение имеет вид:

$$y = 0,059x^2 + 0,1276x + 4,4243; R^2 = 0,9652$$

На рис. 1 представлен график зависимости предела прочности при сжатии от соотношения НФШ и щебня в смеси. Видно, что полученный материал набирает прочность с течением времени, а также при увеличении дозировки нефелинового шлама. Можно заметить, что материал из смеси

нефелинового шлама и цемента без использования щебня обладает пониженной прочностью, что также доказывает необходимость использования армирующих материалов для достижения высоких прочностных характеристик. Низкая прочность при высокой дозировке щебня обусловлена нехваткой минерального вяжущего – нефелинового шлама, что приводит к неполному обволакиванию армирующего материала. Наивысшее значение прочности достигается при 90% содержании нефелинового шлама в смеси, для формирования прочной структуры достаточно 10% щебня в качестве армирующего материала. Использование полученного материала возможно после прохождения срока 28 суток, так как достигается требуемая прочность материала, в дальнейшем материал способен набрать и более высокие физико-механические показатели, так как нефелиновый шлам является медленно твердеющим вяжущим, что подтверждается исследованием [Зубова и др., 2019].

На рис. 2 представлен график зависимости водопоглощения от соотношения НФШ и щебня в смеси. Водопоглощение при всех дозировках соответствует нормам ГОСТ 23558-94¹. При этом материал также будет обладать высокой морозостойкостью за счет использования больших объемов нефелинового шлама в смеси.

Выводы. В исследовании рассмотрен вопрос армирования нефелинового шлама. Для жестких покрытий капитального типа является весомым преимуществом использование нефелинового шлама, армированного щебнем, так как в смеси не присутствуют глинистые частицы, за счет которых образуются коагуляционные дисперсные структуры, это позволяет избавиться от пластичности материала и колейности. Данная структура обладает высокими физико-механическими характеристиками за счет высокой прочности фазовых контактов, с этим связана крайне высокая прочность пространственной сетки структуры в целом при достаточном числе контактов в единице объема, то есть при высокой дисперсности и плотности каркаса [Ребиндер, 1978]. Прочность таких структур может превышать в несколько раз прочность коагуляционных структур той же плотности. Что и подтверждает высокую прочность экспериментального материала.

Одним из недостатков данного материала является то, что конденсационно-кристаллизационные структуры разрушаются необратимо, лишены

¹ ГОСТ 23558-94. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия.

пластичности и эластичности, если этими свойствами не обладают образующие их частицы. Такие структуры с фазовыми контактами в отличие от коагуляционных структур обладают водостойкостью в той степени, в какой водостойкими оказываются сами частицы, например отдельные зерна минералов, сросшиеся в каркасе. Это означает, что адсорбционное понижение прочности под влиянием оводнения кристаллизационной дисперсной структуры хотя всегда имеет место при действии внешних сил, стремящихся разрушить структуру, но оказывается ограниченным: такое понижение прочности обычно составляет 20–30% от начальной прочности, как и для отдельных твердых частиц, входящих в состав каркаса.

Полученный материал с конденсационно-кристаллизационной структурой соответствует требуемым физико-механическим показателям для строительства покрытия лесопогрузочного пункта и требованиям ГОСТ 23558–94.

Библиографический список

Безрук В.М., Ритов М.Н., Глаголева К.М., Чернов И.К. Дорожные основания и покрытия из укрепленных грунтов. М.: Транспорт, 1966. 128 с.

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.

Коновалов С.В., Коганзон М.С., Прокопец В.С., Зырянов А.Б. Проектирование и обеспечение качества строительства дорожных одежд с основаниями из комплексно укрепленных грунтов. М.: МАДИ, 1988. 73 с.

Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия. Избранные труды. М.: Наука, 1978. 368 с.

Холохонова Л.И., Короткая Е.В. Устойчивость и коагуляция дисперсных систем: учеб. пособие. Кемерово, 2000. 106 с.

References

Bezruk V.M., Ritov M.N., Glagoleva K.M., Chernov I.K. Road foundations and coverings made of reinforced soils. M.: Transport, 1966. 128 p. (In Russ.)

Zubova O.V., Siletskiy 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.)

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.)

Kononov S.V., Koganzon M.S., Prokopets V.S., Zyryanov A.B. Design and quality of construction of road pavements with a base of a fortified complex soil. M.: MADI, 1988. 73 p. (In Russ.)

Rebinder P.A. Surface phenomena in dispersed systems. Colloid and surface chemistry. Selected works. M.: Nauka, 1978. 368 p. (In Russ.)

Kholokhonova L.I., Korotkaya E.V. Stability and coagulation of dispersed systems: A tutorial. Kemerovo, 2000. 106 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 24.03.2021

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

Приведено теоретическое и экспериментальное обоснование применения щебеночных дорожных одежд, укрепленных нефелиновым шламом и цементом, для покрытий лесных терминалов. Цель данного исследования – подбор наиболее прочного, технологичного и экономически эффективного материала для погрузочных площадок и складов временного хранения лесоматериалов в связи с ростом частоты применения многоступенчатой вывозки древесины. Результаты исследования показали, что получаемый материал обладает высокой прочностью и водостойкостью, соответствует требованиям ГОСТ к материалам покрытий, в том числе погрузочных пунктов. Приведены рекомендации по дозировкам компонентов смеси.

Ключевые слова: нефелиновый шлам, щебень, лесные дороги, лесопогрузочный пункт, цементобетон.

Zubova O.V., Siletskiy 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. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicoskoj Akademii*, 2021, is. 235, pp. 179–186 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2021.235.179-186

The theoretical and experimental justification of the use of crushed stone road surfaces reinforced with nepheline sludge and cement for covering forest terminals is given. The purpose of this study is to select the most durable, technologically advanced and cost-effective material for loading platforms and temporary storage warehouses for timber due to the increasing frequency of multi-stage wood removal.

The results of the study showed that the resulting material has high strength and water resistance, meets the requirements of GOST for coating materials, including loading points. Recommendations on the dosages of the components of the mixture are given.

Key words: nepheline sludge, crushed stone, forest roads, timber loading point, cement concrete.

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