УДК 67.08; 691.54; 67.03

© И. Р. Мухаррямов, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: mr.irshat@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-16-3-161-169

© I. R. Mukharryamov, post-graduate student
(Saint-Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: mr.irshat@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ НЕФЕЛИНОВЫХ ШЛАМОВ В ПРОЦЕССЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ДОРОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ С ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ

INVESTIGATION OF CHARACTERISTIC FEATURES OF NEPHELINE SLUDGE USED IN THE ROAD CONSTRUCTION DURING THE LIFE CYCLE

Рассматривается применение нефелинового шлама Пикалевского глиноземного комбината и жизненный цикл шлама, начиная от его характеристик, свойств и показателей до его работы в конструктивном слое дорожной одежды. Рассматривается техника, которая используется при устройстве слоев с участием этого материала. Затрагиваются вопросы микротрещинообразования в шламогрунтовых основаниях под влиянием нагрузок от транспортных средств и погодных-климатических факторов. Объясняется процесс по самозалечиванию разрушенных структурных связей в слое конструкции.

Ключевые слова: нефелиновый шлам, дорожное основание, шламогрунт, медленноотвердевающее вяжущее, низкомарочный бетон, укатанный шлам, микротрещины, долговечность.

The paper discusses the use of nepheline sludge at the Pikalyovo alumina plant, characteristics, properties and its work performance in the constructive pavement layer during its life cycle. We consider the technique used in constructing the road layers with the use of this material. The issues of microcrack formation in sludge ground bases under the influence of loads from vehicles and weather and climatic factors are considered. The process of self-healing of damaged structural bonds in the structure layer is explained.

Keywords: nepheline sludge, road base, sludge ground, slow hardening binder, low quality concrete, rolled sludge, microcracks, durability.

Для обеспечения безопасности и эффективности перевозок сеть региональных и местных дорог страны нуждается в постоянном ремонте и своевременной реконструкции. По причине ограниченности бюджета, влияющей на экономическую эффективность и качественное содержание дорог, возникает необходимость применения местных грунтов и отходов промышленности на основе композиционного подхода. При разработке композиционных конструкций отходы часто играют роль связующего материала (матрицы), а различные местные материалы могут рассматриваться в качестве заполнителей (наполнителей). Таким достойным внимания связующим материалом и отходом на Северо-Западе России может быть нефелиновый шлам, применяемый в цементной промышленности, а в качестве заполнителя — местные малопроч-

ные каменные материалы и грунты. В связи с минимальными транспортными затратами применение приведенных строительных материалов и отходов — экономически выгодно и экологически необходимо для региональных и местных автомобильных дорог.

Нефелиновый шлам в качестве дорожного строительного материала начали исследовать с середины 70-х годов прошлого века. Были построены опытные участки как в районах Западной и Восточной Сибири, так и на Северо-Западе в Ленинградской области. В Ленинградском инженерно-строительном институте (ныне СПбГАСУ) первыми начали работать над вопросами применения шламов в строительстве были А. П. Кузнецов, Р. В. Бейшер, П. И. Боженков и В. И. Кавалерова, в Сибири В. М. Бескровный, в Казахстане С. В. Филатов. Полученные ими положительные результа-

ты позволили рассматривать нефелиновый шлам в качестве составной части строительного материала для дорожной сферы.

Конечный продукт, который получается при устройстве композиционного слоя конструкции дорожной одежды, является шламогрунт — низкомарочный бетон медленного твердения, состоящий из местных грунтов и материалов (наполнители) и медленнотвердеющего вяжущего вещества (нефелинового шлама как матрицы). До момента получения этого конечного продукта рассмотрим жизненный цикл нефелинового шлама, который для удобства исследования нужно представить в виде этапов.

Первый этап

Нефелиновый шлам Пикалевского глиноземного комбината (ПГК) получается после переработки нефелиновой руды на алюминий, соду и поташ. Часть шлама (не более 25 %) идет на производство цемента, остальная часть в отвалы (шламохранилища, куда шлам доставляется по трубе с помощью воды — пульпа) [1]. На рис. 1 представлен снимок шламохранилища, на рис. 2 — шламохранилища в зимнее время (февраль) со спутника. На этих снимках можно увидеть, что цвет поверхности шламовых отвалов различный. Это говорит о том, что какая-то часть отвалов уже обезводилась, какая-то часть пережила зиму и прошла процесс самоупрочнения и растрескивания под влиянием погодноклиматических факторов, а какая-то часть является свежей (лежит в отвале не более года).

Нефелиновый шлам, пролежавший в шламохранилище не более года, может быть текущего производства или лежалый (более 1 года). Нефелиновый шлам текущего производства представляет собой пескообразный материал, имеющий влажность около 30 % (по массе). Через 1-2 года нахождения в сухом отвале шлам превращается в монолит с прочностью на сжатие до 6 МПа. Такой шлам можно использовать после его дробления. На рис. 3 шлам в отвале показан уже в процессе высушивания, после потери некоторого количества воды. Таким образом, нефелиновый шлам — это техногенный отход, имеющий свойства цементации медленнотвердеющего вяжущего, является побочным продуктом комплексной переработки нефелиновых руд на глинозем и содопродукты на Пикалевском и Ачинском

Рис. 1. Снимок на шламохранилище Пикалевского глиноземного комбината. Снимок сделан в Google.ru/maps (02.05.2019)

Рис. 2. Снимок шламохранилища Пикалевского глиноземного комбината зимой

Рис. 3. Отвал нефелинового шлама Пикалевского глиноземного комбината

производствах. В свежем отвальном состоянии шлам представляет собой влажный сыпучий пескообразный материал крупностью 0–5 мм. Модуль крупности 1,1–1,5, при этом шлам подвержен агрегации мелких фракций шлама на крупных зернах (крупнее 0,314 мм).

Характерная особенность нефелинового шлама — высокая пористость его частиц от 30 до 60 % при размере пор от 10 до 1000 мкм. Содержание вяжущего компонента белита находится в пределах 75–85 %. Он состоит из силикатов, гидроалюминатов, гидроферритов, карбоната кальция и других соединений. Истинная плотность варьируется от 2,5 до 3,1 т/м³. Объемная насыпная плотность нефелинового шлама во влажном состоянии варьируется от 850 до 1250 кг/м³. Естественная влажность свежего отвального шлама близка к оптимальной и составляет 15–30 %. Оптимальная влажность для использования его в дорожном строительстве составляет 23–26 %.

Нефелиновый шлам текущего производства и дробленый (лежалый) шлам обладают рядом специфических свойств:

- при уплотнении во влажном состоянии он превращается в водостойкий монолитный материал, который со временем, в процессе эксплуатации дороги, увеличивает свою прочность;
- частицы не смерзаются во влажном состоянии при температурах до минус 5 °С, что увеличивает строительный сезон;
- обладает малой теплопроводностью, следовательно, имеет место высокая теплоизолирующая способность нефелинового шлама, что способствует повышению морозоустойчивости дорожной конструкции. Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К) = (0,57 – 0,66), что в 4–6 раз меньше, чем у мерзлых песков;

- длительное время, измеряемое месяцами, не теряет вяжущие свойства при хранении на открытом воздухе;

- затвердевший шлам восстанавливает разрушенную структуру после повторного уплотнения. Это важнейшее конкурентное свойство, которым нефелиновый шлам отличается от других вяжущих материалов.

Для сравнения оценим бокситовый шлам Тихвинского глиноземного завода, который весьма активно применялся в середине 1970-х годов (судя по работам авторов [2–6]). Сравнение химического состава, фазово-минералогического состава приведено в табл. 1 и 2 соответственно. Преимущество нефелиновых шламов перед бокситовым шламом в том, что в бокситовом содержится меньше двухкальциевого силиката (от 40 до 45 % по массе), а также присутствуют сульфаты от 0,3 до 0,5 % по массе по SO₃. Бокситовый шлам содержит до 2 % свободных щелочных окислов, что является серьезным недостатком его как сырьевого компонента. С точки зрения вяжущих свойств нефелиновые шламы имеют преимущество и над другими видами вяжущих такого рода.

1. Нефелиновый шлам ПГК после транспортировки в отвалы может находиться в шламохранилище долгое время. Отход может храниться и летом, и зимой. В связи с этим шлам, пролежавший более года, испытывает процессы обводнения, обезвоживания, самоупрочнения и растрескивания.

2. Важным моментом по активности шлама является следующая особенность, как отмечает автор [7] в своей статье по Ачинскому нефелиновому шламу: НФШ обладает слабыми гидравлическими показателями, потому что при его получении проводят работы по выщелачиванию и гидрошламоудалению, и дисперсные составляющие НФШ частично гидратируются. При этом

Таблица 1

Химический состав портландцемента, нефелиновых и спекательного бокситового шламов

Заводы	Содержание основных окислов, % (по массе)							
	п.п.п	Al ₂ O ₃	SiO ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	R ₂ O	MgO
Портландцемент	0,03–0,3	3–7	20–25	2–5	60–63	–	0,1–2,5	0,4–4,4
Пикалевский	4,4–4,6	2,3–2,6	30,2–30,8	2,1–2,5	56,8–57,5	–	1,6–1,7	1,3–1,4
Бокситогорский	4,0–4,4	7,7–9,0	17,5–19,2	24–26	35–38	3,1–3,8	5,0–5,5	–
Ачинский	4,0–5,0	3,2–3,5	27,9–28,5	3,6–4,2	54,5–55,3	–	1,7–1,8	1,5–1,6

Таблица 2

Фазово-минералогический состав шламов

Содержание фаз, % (по массе)		Заводы		
		Пикалевский	Бокситогорский	Ачинский
Вязущая фаза	Двухкальциевый силикат — смесь *β и α' форм примесными окислами	75–85 ** (степень разложения 5–6 %)	** 38–45	** 70–75 (степень разложения 8–9%)
Условновязущая фаза	ГЛСН ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) $R^\circ \cdot y\text{H}_2\text{O}$	0,6–1,0	*** 5–10	0,3–0,5 *
	Гидрогранаты $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2 \cdot (6-2n)\text{H}_2\text{O}$	следы	*** 10–15	2–4
	Неразложившаяся фаза NAS_2 , NCS	3–4	3–5	9–10
	Гидросиликаты	** 3–5 (смесь CSH-I) ($\text{C}_2\text{SH-I}$)	1–2 C_2SH_2 (аналог CSH(B)г)	** 7–10 (смесь гидросиликатов)
Фазы, которые не имеют вяжущих свойств	Алюминат натрия	1–1,5 (моно-алюминат)	1–2 (гидроалюминат)	1–1,5 (гидроалюминат натрия)
	Карбонат кальция	12–13	Следы	3–4
	Соединения железа	0,5–1,0 (гидроферрит кальция)	*** 25–30 аморфизированный гидроксид железа	4–5 (гидроферрит, алюмоферрит кальция)

Примечания:

R° — присоединяемый к натриевому пермутиту ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) компонент, которым может быть алюминат натрия, сода или NaOH .

* Соотношения β и α' форм в Пикалевском и Ачинском шламах 75–80/25–80, в бокситовом шламе 60–70/30–40, α' форма — более гидравлически активна.

** Жирным шрифтом выделены фазы, определяющие долговечность дорожных конструкций в первую очередь.

*** Фазы, которые за счет физико-химических процессов «старения» шлама (гидролиз, гидратация, последовательная карбонизация, фазовые переходы) претерпевают изменения в объеме, приводящие (см. ниже) либо к рассыпанию слоя дорожной конструкции с последующим возможным вымыванием в осенне-зимний период, либо к частичной потере прочности дорожной конструкции. Из всех изменяющихся в дорожных одеждах фаз бокситового шлама только гидратация двухкальцевого силиката приводит к упрочнению дорожной конструкции.

образуются вокруг зерен шлама пленки, которые мешают попасть воде к безводной части зерна. Из-за выщелачивания в шламе образуются неактивные соединения гидрогранатов.

3. Химический состав пикалевского нефелинового шлама близок по составу к портландцементу, но имеет свои особые свойства: медленное твердение. Также нефелиновый шлам содержит в себе достаточное количество гидравлически активного компонента бета-двухкальцевого силиката, что дает возможность использовать рядовой нефелиновый шлам в качестве вяжущего

материала для устройства из него монолитных оснований.

4. Согласно табл. 2 вязущая фаза у пикалевского и ачинского нефелиновых шламов выше, чем у бокситогорского шлама. Явное преимущество позволяет судить о том, что результаты внедрения будут лучше, чем от внедрения бокситового шлама.

5. Сравнение химического и фазово-минералогического состава вышеперечисленных отходов также показывает, что применение нефели-

нового шлама ПГК будет более эффективно, чем его аналогов.

6. Исследование фазово-минералогического состава затвердевших проб, вяжущих показало, что основными структурообразующими новообразованиями в них являются гидросиликаты кальция. С увеличением срока твердения в нормальных условиях образуются гидросиликаты кальция типа тоберморита и ксонолита, гидроферриты кальция, а также сложные силикаты типа окерманита или ранкинита. Следовательно, физико-механические свойства дорожных слоев из каменных материалов, обработанных вяжущим, а также технологические параметры при их использовании в ранние сроки должны обуславливаться в первую очередь свойствами гидросиликатов, являющихся основным структурообразующим звеном в таких материалах.

Второй этап

Транспортировка нефелинового шлама на строительную площадку начинается с момента погрузо-разгрузочных работ. В момент погрузки экскаватором в автосамосвалы нефелиновый шлам претерпевает рыхление, испытывают механическое воздействие. В связи с этим происходит частичное разрушение гидратных новообразований на поверхности зерен (об образовании этих пленок говорилось в выводе 2 этапа 1). Из-за этого разрушения гидравлическая активность также частично вырастает, что позволяет получить продукт с повышенной прочностью.

Похожее механическое разрушение зерна нефелинового шлама дополнительно получают во время транспортировки на место строительства (эффект уплотнения под своим весом), а также в процессе разгрузки (разрыхление). Ко всему прочему нефелиновый шлам во всех процессах испытывает выветривание/резкое высушивание относительно начальных характеристик. Следует отметить, что разгруженный НФС на поверхности не следует выдерживать долгое время тонким слоем (менее 30 см), так как это повлияет на ее удобоукладываемость, что отразится на степени уплотненности. В ходе перевозок частично исключается агрегация мелких фракций шлама на крупных зернах (крупнее 0,314 мм).

Таким образом, в процессе погрузки, транспортировки и выгрузки гидравлическая активность зерен нефелинового шлама повышается,

что придает шламогрунту повышенные прочностные показатели.

Третий этап

Технология строительства шламогрунтовых оснований. Шламогрунт представляет собой композиционный слой, который создается на базе матрицы (включающей вещество) и наполнителя (местных каменных материалов и грунтов). Матрица — это связующая система или устойчивая система объединения, создающаяся с помощью связей, специальных состояний и размеров, охватывающая и объединяющая наполнитель в композит, обладающий необходимыми для условий применения специальными свойствами, превосходящими свойства отдельных наполнителей (т. е. превосходящими свойства материалов, взятых в отдельности).

Важнейший принцип проектирования дорожной конструкции, ее ремонта и реконструкции — возможность и обоснованность использования местных дорожно-строительных материалов и отходов промышленного производства в эффективной зоне строительства. Для региональных дорог соблюдение этого принципа является основополагающим.

Имеется два технологических способа применения нефелинового шлама при устройстве слоя конструкции дорожной одежды: на месте (на дороге) и в заводских условиях. Второй способ исключается, так как предполагается применение местных материалов, что уже подразумевает подвоз вяжущего на место строительства. Остается первый способ — приготовление на дороге.

Для устройства монолитных дорожных оснований рекомендуется использовать рядовой отвальный нефелиновый шлам в сочетании с минеральным заполнителем или без него. Нефелиновый шлам, используемый для устройства слоев дорожных одежд, должен удовлетворять следующим требованиям.

Содержание в шламе комков размером 120 мм не должно быть более 15 %. Влажность шлама, укладываемого в дорожную одежду, не должна превышать 25–30 %.

Нефелиновый шлам в исходном виде или в смеси с минеральным заполнителем, уплотненный при оптимальной влажности под давлением 15 МПа, должен иметь следующие значения предела прочности при сжатии в возрасте 90 суток:

не менее 1 МПа — при использовании его для устройства морозозащитного слоя; 2 и 4 МПа — для нижнего и верхнего слоев основания соответственно. Прочность на изгиб должна быть не менее 0,2; 0,6 и 1,0 МПа соответственно, коэффициент морозостойкости не менее 0,65; 0,7 и 0,75. Ориентировочно оптимальная влажность шлама должна составлять 23–26 %.

Для устройства слоя дорожных одежд из рядового отвального нефелинового шлама выполняют следующие работы [8]:

- вывозят шлам на подготовленное земляное полотно или слой дорожной одежды;
- предварительно распределяют шлам по поверхности нижележащего слоя или земляного полотна;
- увлажняют шлам до оптимальной влажности (в случае необходимости) с помощью поливочной машины с последующим перемешиванием профилировщиком ДС-97 или автогрейдером;
- окончательно распределяют и профилируют шлам профилировщиком ДС-97 или автогрейдером на проектную толщину с учетом коэффициента уплотнения;
- уплотняют шлам катками на пневматических шинах до плотности 0,98 стандартной.

При распределении шлама по поверхности земляного полотна содержащиеся в нем комки обычно полностью разрушаются под гусеницами или отвалом бульдозера [9]. Неподдающиеся разрушению комки размером более проектной толщины устраиваемого слоя должны быть удалены. В зависимости от имеющихся механизмов и транспортных средств, длину сменной захватки следует назначать в пределах 300–600 м. Плотность шлама после укатки должна быть не менее 0,98 максимальной плотности, определенной стандартным способом.

По уплотненному слою из шлама допускается сразу открывать движение технологического транспорта с условием регулирования движения по всей ширине слоя или устраивать вышележащий слой дорожной одежды. В сухую погоду во избежание высыхания поверхности шламового слоя и пылеобразования следует его поливать водой не реже одного раза в сутки.

В итоге можно отметить:

1. Прочность материала дорожного основания по рассмотренным технологиям транспортировки и строительства будет складываться из полученной прочности, зависящей от его расчетного состава, прироста прочности за счет оптимального времени выдерживания смеси до ее уплотнения и прироста прочности при уплотнении, степени уплотнения от применения комбинированных режимов укатки.

2. Предположительно при устройстве шламогрунтовых оснований необходимо учесть такие показатели, как температура воздуха, скорость ветра, время выдерживания НФС на дороге, влажность смеси и воздуха.

Четвертый этап

Основание дорожной одежды — шламогрунт (медленнотвердеющий низкомарочный бетон). В табл. 3 приведены некоторые физикомеханические свойства нефелинового шлама в слое КДО.

Как видно из таблицы, слой шламогрунта перестает интенсивно набирать прочность уже после года эксплуатации (года набора прочности, года твердения); слой начинает работать как цементогрунт и цементобетон. Процесс растрескивания происходит так же, как и у цементобетонного слоя. Отсюда вытекает вывод о том, что применение формул, предназначенных для цементогрунтовых, цементобетонных оснований и покрытий, с учетом особенностей возможно и для шламогрунтов (низкомарочных бетонов).

Применяя нефелиновый шлам с местными каменными материалами, необходимо устраивать такой конструктивный слой, где шлам и заполнитель расположатся так, что достигнут высокой плотности низкомарочного бетона. Наличие у нефелинового шлама особых свойств предопределяет и ряд особенностей в технологии его применения. Так, медленное твердение шлама обуславливает возможность хранения шлама или готовых шламоминеральных смесей в штабелях на открытых площадках длительное время практически без потери вяжущих свойств, а также перевозки на большие расстояния в транспортных средствах, предназначенных для перевозки грузов навалом. Малая теплопроводность шлама и наличие в его составе небольшого количества соединений щелочных металлов пре-

Таблица 3

**Физико-механические свойства
нефелинового шлама в слоях КДО**

Наименование свойств	Показатели нефелинового шлама
Средняя плотность в уплотненном состоянии при оптимальной влажности, кг/м ³	1800–1850
Предел прочности на сжатие, МПа: сразу после уплотнения нагрузкой 15 МПа	1,0–1,2
через 90 суток твердения	4,0–6,0
через год твердения	9,0–10,0
через 3–5 лет	12,0–15,0
Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа:	
через 90 суток твердения	1,6–2,4
через год твердения	2,6–3,0

пятствуют смерзанию шлама в штабеле при длительном хранении в зимний период и дают возможность вести дорожно-строительные работы при отрицательных температурах без усложнения технологии строительства и снижения качества работ. Слои дорожной одежды, построенные в зимнее время, с наступлением теплого периода при необходимости могут быть вновь профилированы и уплотнены. Способность нефелинового шлама приобретать начальную прочность сразу же после уплотнения позволяет открывать движение автотранспорта сразу после окончания укатки слоя из шлама или шламоминеральных материалов. Свойство затвердевшего шлама восстанавливать разрушенную структуру после повторного уплотнения дает возможность устранять дефекты, возникшие на шламовом слое в ходе его эксплуатации в течение 2–3 недель до начала устройства вышележащего слоя дорожной одежды.

Конструирование и расчет дорожных одежд со слоями из нефелинового шлама и материалов, укрепленных шламом, выполняют в соответствии с нормами.

При разработке конструкций дорожных одежд с применением местных каменных материалов необходимо стремиться учесть вероятный характер их разрушения исходя из фактических условий работы. В связи с этим учитываются

критерии применения местных каменных материалов: *сопротивление истираемости* (когда каменный материал подвергается истиранию, в ней могут возникнуть микроразрушения); *постоянство упругих характеристик*; *влагостойкость*; *морозостойкость в нормативных пределах*; *достаточный модуль упругости*; *форма зерен*.

Обязательным является выяснение механических и теплофизических свойств у применяемых каменных материалов. Также необходимо отметить, что конструктивные слои дорожных одежд, устроенные с применением местных каменных материалов, нужно защищать от резких изменений влажности [10, 11], а также усилить их в целях повышения сопротивляемости слоев оказываемых нагрузок со стороны транспортных средств, движущихся на высоких скоростях.

Пятый этап

Процессы, возникающие в слоях конструкции дорожной одежды, устроенных с применением нефелинового шлама во время эксплуатации дороги. На шламогрунт оказывают влияние нагрузки от транспортных средств и погодные климатические факторы. В цементобетоне происходит постепенное накопление повреждений, что приводит к образованию микротрещин. Длина микротрещин растет до определенного момента, пока они не объединятся в одну микротрещину [12, 13, 14]. У начала этой микротрещины возникает местное увеличение напряжений, называемое концентрацией напряжений, которое выступает ускорителем ее дальнейшего роста. Развитие трещины вызывает разрушения КДО. Такой процесс постепенного накопления дефектов под действием переменных напряжений называют циклической усталостью цементобетона. В цементобетоне крупные и нарастающие по ширине (процесс закончен) трещины развиваются по ослабленному сечению (с максимальным НДС). Согласно табл. 3 стоит отметить, что в шламе из-за медленного набора прочности с течением времени малые трещины (процесс продолжается) переформирует бетон до максимальной прочности, а затем начинается чистое разрушение однородного бетона.

Процесс набора прочности шлама от динамического воздействия нагрузки и уплотнения вместе с образованием микротрещин с каждым наездом транспортного средства в процессе экс-

плутации приводит к их (шламов) активации и переформированию слоя (медленному и постепенному мелкозернистому шламобетону). В шламе после укладки и годовой эксплуатации происходят два процесса:

- постепенное трещинообразование;
- зализывание трещин параллельно первому процессу.

Предполагаемая причина медленного набора прочности слоев, устроенных с применением нефелинового шлама, возможно заключается в следующем: набор прочности происходит в ходе эксплуатации, а также и при укладке и уплотнении. Шламовый слой получает определенную структуру, которая даже после уплотнения продолжает структурироваться (продолжается процесс структурообразования). Процесс структурообразования продолжается даже после того как уложили в виде слоя. Такой минимальной прочности согласно табл. 3 достаточно для пропуска транспортных средств. Потом под действием нагрузки от транспортных средств шламогрунт со временем постепенно доформируется (переупаковывается, переформируется, структурируется), у него возникают структурные связи, однако это долгий процесс в жизненном цикле. Затем, когда структура у слоя шламогрунта становится плотной, начнется трещинообразование (как и у цементобетона) в виде микротрещин. Этот процесс (см. табл. 3) продолжается от одного года до 3–5 лет. Если до момента полного формирования структурных связей (до момента создания плотной структуры/микроструктуры) слой работал по принципу замедленного твердения (замедленное структурообразование, твердение, набор прочности), то, после того как пройдет от 1-го до 5 лет, слой начнет давать реальные микротрещины, как и цементобетонное основание. В итоге через время в таком конструктивном слое (в шламогрунте) пойдет такой же процесс микротрещинообразования, как у цементобетона. Но важнейшим преимуществом шламогрунтового основания и покрытия от цементобетонного в том, что появляется время (1–5 лет) до момента трещинообразования, что увеличивает срок службы дорожной одежды.

Заключение

Применение нефелинового шлама в дорожном строительстве позволяет повысить темпы сооружения дорог, снизить их стоимость, сэкономить материальные и топливно-энергетические ресурсы, уменьшить трудоемкость строительных работ и увеличить в 1,5–2 раза срок службы дорожной одежды за счет способности нефелинового шлама увеличивать длительное время прочность слоя в процессе эксплуатации дороги. С применением нефелинового шлама построены сотни километров дорог IV–I категорий в IV–II дорожно-климатических зонах. Шлам использовался при строительстве магистралей: Омск–Новосибирск, Новосибирск–Красноярск, Омск–Павлодар, Павлодар–Караганда, Павлодар–Семипалатинск. Пикалевский шлам в 2006 году использовался на 29-километровом участке федеральной трассы под Смоленском, а в 2012 году с использованием шлама реконструирован участок автодороги в Обрино в Ленинградской области.

Библиографический список

1. Мухаррамов И. Р. Вопросы использования нефелиновых шламов в дорожных конструкциях // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1 (60). С. 192–197.
2. Кузнецов А. П. Дорожные основания из щебня, укрепленного бокситовым шламом и обожженными, известняковыми отходами // Автомобильные дороги, 1983. 26 с.
3. Бейшер Р. В. Укрепление грунтов бокситовым шламом с добавками активаторов твердения // Автомобильные дороги и мосты. Геодезия: сб. докладов к XXVIII научной конференции ЛИСИ. Л.: ЛИСИ, 1969. С. 8–11.
4. Бейшер Р. В. Использование бокситового шлама для укрепления грунтов // Автомобильные дороги. 1976. № 6. С. 9–10.
5. Бескровный В. М., Дежина Н. С., Жвакин П. А. и др. Укрепление грунта нефелиновым шламом // Автомобильные дороги. 1979. № 3. С. 19–20.
6. Артюхина Г. И. Исследование бокситовых шламов, обработанных органическими вяжущими материалами, и применение их при строительстве местных дорог на Северо-Западе РСФСР: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.14.
7. Патент 2047576 Российской Федерации. Вяжущее / Калашников В. И., Кочетков Ю. А. и др. 10.11.1995.
8. Бескровный В. М. Применение нефелинового шлама для строительства оснований автомобильных

дорог в условиях Сибири: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.14.

9. Мухарьямов И. Р. Использование вторичного минерального сырья в устройстве земляного полотна и повышение сдвигоустойчивости основания дорожной одежды // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2015. № 4(12). С. 120–124.

10. Золотарь И. А. Расчет испарения с поверхности грунтов оснований в связи с прогнозом их влажности // Экспериментальные исследования процессов теплообмена в мерзлых горных породах. М.: Наука, 1972. С. 25–26.

11. Ржаницын Б. А. Преобразование грунтов физико-химическими методами // Искусственное закрепление грунтов: тр. НИИ оснований и фундаментов № 17. М.: Госстройиздат, 1952. С. 4–12.

12. Носов В. П. Цементобетонные покрытия автомобильных дорог. Прогнозирование повреждений на основе математического моделирования. М.: МАДИ, 2013. 228 с.

13. Носов В. П. Прогнозирование срока службы цементобетонных покрытий // Надежность автомобильных дорог. М.: МАДИ, 1980. С. 106–112.

14. Бабаскин Ю. Г., Леонович И. И. Цементобетонные дорожные покрытия и их трещиностойкость // Вестник БНТУ. 2011. № 1. С. 9–12.

References

1. Mukhar'yamov I. R. *Voprosy ispol'zovaniya nefelinovykh shlamov v dorozhnykh konstruktsiyakh* [Issues concerning the use of nepheline sludge in road constructions]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 1 (60), pp. 192–197.

2. Kuznetsov A. P. *Dorozhnye osnovaniya iz shchebnya, ukreplennogo boksitovym shlamom i obozhzhennymi, izvestnyakovymi otkhodami* [Road bases of crushed stone reinforced with bauxite sludge and burnt limestone waste]. *Avtomobil'nye dorogi* [Highways], 1983, 26 p.

3. Beysher R. V. *Ukreplenie gruntov boksitovym shlamom s dobavkami aktivizatorov tverdeniya* [Strengthening of soils with bauxite sludge with additives of hardening activators]. *Trudy XXVIII nauchnoy konferentsii LISI «Avtomobil'nye dorogi i mosty. Geodeziya»* [Proceedings of the XXVIII scientific conference, LISI "Highways and bridges. Geodesy"]. Leningrad, LISI Publ., 1969, pp. 8–11.

4. Beysher R. V. *Ispol'zovanie boksitovogo shlama dlya ukrepleniya gruntov* [Use of bauxite sludge for strengthening the soil]. *Avtomobil'nye dorogi – Highways*, 1976, no. 6, pp. 9–10.

5. Beskrovnyy V. M., et al. *Ukreplenie grunta nefelinovym shlamom* [Reinforcement of soils with nepheline sludge]. *Avtomobil'nye dorogi – Highways*, 1979, no. 3, pp. 19–20.

6. Artyukhina G. I. *Issledovanie boksitovykh shlamov, obrabotannykh organicheskimi vyazhushchimi materialami, i primeneniye ikh pri stroitel'stve mestnykh dorog na Severo-Zapade RSFSR. Diss. kand. tekhn. nauk* [Study of bauxite slurries treated with organic binders and their application in the local roads construction in the North-West of the RSFSR. PhD in Sci. Tech. diss.]. 2014.

7. Kalashnikov V. I., et al. *Vyazhushchee* [Binders]. Patent Rossiyskoy Federatsii no. 2047576 [Patent RF no. 2047576]. 1995.

8. Beskrovnyy V. M. *Primeneniye nefelinovogo shlama dlya stroitel'stva osnovaniy avtomobil'nykh dorog v usloviyakh Sibiri. Diss. kand. tekhn. nauk* [Use of nepheline sludge for construction of road foundations in Siberia. PhD in Sci. Tech. diss.]. 2014.

9. Mukhar'yamov I. R. *Ispol'zovanie vtorichnogo mineral'nogo syr'ya v ustroystve zemlyanogo polotna i povysheniye sdvigoustoychivosti osnovaniya dorozhnoy odezhdy* [Use of secondary mineral raw materials in the construction of the roadbed and increase of the shear resistance of the pavement base]. *Tekhnicheskoe regulirovaniye v transportnom stroitel'stve – Technical regulation in transport construction*, 2015, no. 4(12), pp. 120–124.

10. Zolotar' I. A. *Raschet ispareniya s poverkhnosti gruntovykh osnovaniy v svyazi s prognozom ikh vlazhnosti* [Calculation of evaporation from the surface of soil bases in connection with the forecast of their moisture content]. *Sb. «Ehksperimental'nye issledovaniya protsessov teploobmena v merzlykh gornykh porodakh»* [Coll. works "Experimental studies of heat transfer processes in frozen rocks"]. Moscow, Nauka Publ., 1972. Pp. 25–26.

11. Rzhantsyn B. A. *Preobrazovanie gruntov fiziko-khimicheskimi metodami* [Transformation of soils by physical and chemical methods]. *Trudy NII osnovaniy i fundamentov no. 17 «Iskusstvennoye zakrepleniye gruntov»* [Proc. of the Research Institute of Bases and Foundations no. 17 "Artificial soil fixation"]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1952, pp. 4–12.

12. Nosov V. P. *Tsementobetonnye pokrytiya avtomobil'nykh dorog. Prognozirovaniye povrezhdeniy na osnove matematicheskogo modelirovaniya* [Concrete pavement of motor roads. Damage prediction based on mathematical modeling]. Moscow, MADI Publ., 2013, 228 p.

13. Nosov V. P. *Prognozirovaniye sroka sluzhby tsementobetonnykh pokrytiy* [Prediction of service life of cement concrete surfaces]. *Nadezhnost' avtomobil'nykh dorog* [Reliability of motor roads]. Moscow, MADI Publ., 1980, pp. 106–112.

14. Babaskin Yu. G., Leonovich I. I. *Tsementobetonnye dorozhnye pokrytiya i ikh treshchinostoykost'* [Concrete road surfaces and their crack resistance]. *Vestnik BNTU – Bulletin of BNTU*, 2011, no. 1, pp. 9–12.