

УДК 691.54:625.7/.8

DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-3-110-121

© И. Р. Мухарьямов, старший преподаватель
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: imuharryamov@lan.spbgasu.ru

© I. R. Mukharryamov, senior lecturer
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: imuharryamov@lan.spbgasu.ru

ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО СТАРЕНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА БЕЛИТОВЫХ ШЛАМОВ ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

THE INFLUENCE OF NATURAL AGING ON THE STRENGTH PROPERTIES OF BELITE SLUDGE FOR ROAD CONSTRUCTION

Проведен анализ влияния естественного старения белитовых (нефелиновых) шламов на их годность в качестве материала для слоев конструкций дорожных одежд. Установлена закономерность: при хранении шлама в отвале происходит процесс карбонизации материала, количественно это выражается в росте показателя потерь при прокаливании (п. п. п.) до 23 %, что приводит к снижению прочности экспериментальных образцов. Отмечено, что действующая классификация в Отраслевом дорожном методическом документе (ОДМ 218.3.043–2015) не полностью учитывает такую динамику, что создает возможный риск завышения расчетных характеристик при разработке многослойных конструкций автомобильных дорог. Результаты работы, включая предложенные корреляционные зависимости, дают научное обоснование для уточнения нормативной базы в части назначения характеристик материалов с учетом срока их хранения и являются основой для разработки оперативного критерия контроля их качества по показателю потери при прокаливании (необходимость учета кинетики старения нефелиновых шламов).

Ключевые слова: нефелиновый шлам, ларнит, кальцит, медленнотвердеющее вяжущее.

There has been carried out an analysis to determine the impact of natural aging of belite (nepheline) sludge on the suitability of the sludge as a material for road pavement layering. The study has identified the following pattern: when slurry is stored in a waste heap, the material undergoes carbonization, which is quantified by an increase in the loss on ignition (LOI) of up to 23 %, which leads to a reduction in the strength of experimental samples. It is noted that the currently valid classification in the Industry Road Methodological Document (IRMD 218.3.043–2015) does not fully account for this dynamics, which creates a potential risk of overestimating design characteristics when developing multilayer road structures. The results of the study, including the proposed correlation dependencies, provide a scientific basis for refining the regulatory framework in terms of assigning characteristics to materials taking into account their shelf life and may be considered the basis for developing an operational criterion for monitoring their quality based on the loss on ignition indicator (the need to take into account the kinetics of aging of nepheline sludge).

Keywords: nepheline sludge, larnite, calcite, slow-setting binder.

Введение

Белитовые шламы, согласно методическим рекомендациям (МР) по устройству дорожных оснований и переходных покрытий с применением белитового шлама в неф-

тегазоносных районах Западной Сибири от 1985 г., подразделяются на нефелиновые шламы (НФС) по Техническим условиям 48-0114-19-84 «Шламы нефелиновые (белитовые) глиноземного производства» и бок-

ситовые шламы (БШ) по Техническим условиям 48-2853-3/0-85 «Отвальный красный шлам для дорожного строительства», как и в Стандарте национального объединения строителей СТО НОСТРОЙ 2.25.33-2011 «Устройство оснований дорожных одежд. Часть 5. Строительство щебеночных оснований, обработанных в верхней части цементно-песчаной смесью или белитовым шламом по способу пропитки» от 2012 г., и в методических рекомендациях 218.3.043-2015 по применению в слоях дорожных одежд натуральных белитовых шламов от 2015 г. Различия в этих документах возникают при разделении шламов по активности и несмотря на то, что при сохранении концепции использования белитовых шламов в них последовательно сокращается объем регламентируемых данных о физико-химическом показателе и физико-механических свойствах (табл. 1).

В данной таблице рассматриваются исключительно параметры, непосредственно связанные с целью работы — оценкой влияния естественного старения на свойства нефелиновых шламов. К ним отнесены по важности: 1) срок хранения, 2) потери при прокаливании (п. п. п.), 3) прочностные показатели. Прочие аспекты нормативных документов требуют отдельного исследования.

Такая тенденция может оказать существенное влияние на проектно-строительную практику в перспективе. Применение белитовых шламов в конструкциях автомобильных дорог остается актуальным вопросом — это экономически [1-4] и экологически [5-10] эффективно.

Методы

- Хронологическое сравнение требований к нефелиновым шламам в нормативных документах с выделением показателей (срок хранения, п. п. п., прочностные показатели лабораторных образцов).

- Анализ данных из экспериментальных работ над пробами 40-50-летней лежалости. Качественный анализ факторов старе-

ния (учет влияния естественного старения нефелиновых шламов на шламовых полях на фазы образования белита и кальцита).

- Выявление эмпирических зависимостей (кинетика потерь при прокаливании от времени лежалости нефелиновых шламов в отвалах; связанность между содержанием кальцита и показателем потерь при прокаливании; упрощенная модель зависимости прочности от минералогического состава и технопараметров).

- Обоснование важности учета естественного старения при классифицировании белитовых шламов и введения инструмента оперативного контроля п. п. п. в ОДМ 218.3.043-2015.

Результаты и обсуждение

Проведен критический анализ данных о прочности белитовых шламов. Рассмотрим данные разных исследователей по установлению физико-механических и химических свойств нефелиновых шламов Пикалёвского глиноземного завода (ПГЗ) и Ачинского глиноземного комбината (АГК), начиная с 1983 г. по настоящее время (табл. 2).

Наблюдается разброс значений $R_{сж}$ в несколько раз на 90-е сутки, несмотря на то что все исследованные образцы изготовлены из одного вида материала — нефелинового (белитового) шлама. Можно сделать вывод, что данные разных исследователей о ключевых факторах, которые влияют на свойства нефелиновых шламов (срок хранения, условия твердения, гранулометрия), носят фрагментарный характер, и это не позволяет установить однозначные причинно-следственные связи. Прямое сравнение таких данных методически некорректно из-за различий в технологии приготовления и испытания образцов (не во всех исследованиях указаны условия хранения образцов, давление и время уплотнения).

Таким образом, обобщенный анализ доступных данных показал, что существующая классификация в ОДМ 218.3.043-2015

Таблица 1

Сравнительный анализ нормативных требований к белитовым шламам

Сравниваемый параметр	МР по устройству дорожных оснований и переходных покрытий с применением белитового шлама в нефтегазоносных районах Западной Сибири от 1985 г.	СТО НОСТРОЙ 2.25.33–2011 от 2012 г.	ОДМ 218.3.043–2015 от 2015 г.	Примечание
Виды белитовых шламов	1. Нефелиновый. 2. Бокситовый	1. Нефелиновый. 2. Бокситовый	1. Нефелиновый. 2. Бокситовый	
Активность шламов в зависимости от содержания вяжущего компонента (белита)	1. Высокоактивный, свыше 55 % (НФШ). 2. Активный, 40–55 %. 3. Малоактивный, 30–40 % (БШ)	1. Высокоактивный, свыше 55 % (НФШ). 2. Активный, 40–55 %. 3. Малоактивный, 30–40 % (БШ)	Диапазон белита: 30–85 % 1. Высокоактивный. 2. Активный. 3. Слабоактивный	Классификация по активности в ОДМ 218.3.043–2015 дана без точных процентных границ
Срок хранения шламов и потери при прокаливании (п. п. п.)	1. Текущего производства: • до 1 года, • п. п. п. < 10 %. 2. Лежалый: • от 1 года до 10 лет, • п. п. п. ≥ 10 %	1. Текущего производства: • до 1 года. 2. Лежалый: от 1 года до 10 лет	1. Текущего производства: • до 1 года. 2. Лежалый: • свыше 1 года	1. Отсутствие норматива по п. п. п. в двух последних нормативных документах. 2. Отмена верхнего предела (10 лет) для лежалого шлама в ОДМ
Классификация шламов по прочности при сжатии через 90 сут, МПа	1. Высокоактивный шлам, свыше 5. 2. Активный шлам, 2,5–5,0. 3. Малоактивный шлам, 1,0–2,5	1. Высокоактивный шлам, свыше 5. 2. Активный шлам, 3,5–5,0. 3. Малоактивный шлам, 1,0–2,5	1. Высокоактивный (ВА), свыше 5,0. 2. Активный (А), 2,5–5,0. 3. Слабоактивный (СА), менее 2,5	1. Для активного шлама указан аномально высокий нижний предел (3,5 МПа), что может быть опечаткой или необоснованным ужесточением. 2. В ОДМ для слабоактивного шлама не установлена нижняя граница прочности, что допускает использование материалов с неопределенно низкой несущей способностью
Применение активирующих добавок	Рекомендованы: известь (3–4 %), портландцемент (2–4 %), цементная пыль (16–20 %)	Рекомендованы: известь (3–4 %), портландцемент (2–4 %), цементная пыль (16–20 %)	Не упомянуты	Отсутствие в ОДМ указаний по применению активирующих добавок не позволяет компенсировать свойственное шламам медленное твердение и низкую активность в натуральном виде
Расчетные деформационно-прочностные характеристики ($E_{упр}$, $R_{изг}$, α)	1. Высокоактивный шлам: $E_{упр} = 1000$ МПа, $R_{изг} = 1,2$ МПа. 2. Активный шлам: $E_{упр} = 1000$ МПа, $R_{изг} = 1,0$ МПа. 3. Малоактивный шлам: $E_{упр} = 300$ МПа, $R_{изг} = 0,3$ МПа	1. Высокоактивный шлам: $E_{упр} = 1000$ МПа, $R_{изг} = 1,2$ МПа. 2. Активный шлам: $E_{упр} = 1000$ МПа, $R_{изг} = 1,0$ МПа. 3. Малоактивный шлам: $E_{упр} = 300$ МПа, $R_{изг} = 0,3$ МПа	1. Высокоактивный (ВА): $E_{упр} = 1250$ МПа, $R_{изг}$ отсутствует. Коэффициент упрочнения $\alpha = 2,0$. 2. Активный (А): $E_{упр} = 870$ МПа, $R_{изг}$ отсутствует. Коэффициент упрочнения $\alpha = 1,7$. 3. Слабоактивный (СА): $E_{упр} = 450$ МПа, $R_{изг}$ отсутствует. Коэффициент упрочнения $\alpha = 1,4$	1. В ОДМ отсутствуют ключевые прочностные показатели ($R_{изг}$). 2. Введен новый параметр — коэффициент упрочнения (α), учитывающий рост прочности во времени. 3. Значения модуля упругости ($E_{упр}$) в ОДМ дифференцированы по классам активности и в целом завышены по сравнению с ранними документами, что требует экспериментального подтверждения

Таблица 2

Сравнительный анализ свойств шламов по данным различных исследований

Параметр	Исследование № 1 [13–15] (П. И. Боженов, 1983 г.)	Исследование № 2 [11] (Б. В. Белоусов, 2000 г.)	Исследование № 3 [12] (М. П. Клековкина, 2010 г.)	Исследование № 4 [16, 17] (А. А. Лыткин, 2017 г.)	Исследование № 5 [3] (В. В. Силецкий, 2018–2022 гг.)
Проба НФШ	Шлам ПГЗ	Шлам АГК	Шлам ПГЗ	Шлам АГК	Шлам ПГЗ
п. п. п. в %	1–5,5	6,78	Нет данных	Нет данных	2,87–5,40
Срок хранения	Нет данных	Текущего производства	Около 2 лет в отвале	Текущего производства	Нет данных
$R_{ск}$ чистого шлама в 90-суточном возрасте, МПа	2,38–3,31	6,72	2,4–5,6	4,0–6,0	6,8–7,5
Геометрия образцов для испытаний	Нет данных	Нет данных	Балочки 4×4×16 см, цилиндры $h = d = 5$ см	Нет данных	Нет данных
Давление и время уплотнения образцов, при влажности	Нет данных	$W_{опт.}$	15 МПа, 3 мин, $W_{исх} = 23$ %	15 МПа, 3 мин, $W_{опт.} = 23–26$ %	Нет данных
Хранение образцов	Воздушное	Нет данных	18–20 °С, относит. влажность воздуха 95 %	Нет данных	Воздушно-влажная среда
Гранулометрия (зерновой состав) пробы	Естественная	Естественная	Естественная	Естественная	Естественная

не в полной мере учитывает фактор естественного старения, что подтверждается падением прочности (нижняя граница) у пролежавших два года в отвале шламов [12] по сравнению со шламами текущего производства [11, 16, 17] при схожей сырьевой базе (ПГЗ, АГК). Это является практическим ограничением действующего документа. Такой качественный тренд, а не прямое сравнение цифр, и служит обоснованием для дальнейшего анализа влияния естественного старения на свойства материала.

Качественный анализ факторов, определяющих прочность нефелиновых шламов

С момента попадания нефелинового шлама на шламовые поля он начинает стареть как хронологически, так и химически. Старе-

ние нефелиновых шламов можно выразить через рост содержания кальцита и снижение ларнита (белита) при длительном хранении в шламоотвалах, а также через показатель потерь при прокаливании (п. п. п.). Меняется состав (минералогический, фазовый) структуры нефелинового шлама, в первую очередь в зависимости от сроков хранения в шламоотвалах: после слива пульпы поверхность шлама (поверхностный слой толщиной до 0,5 м) высыхает, выветривается, формируется твердеющая корочка, так как происходит воздействие атмосферы и различных физических факторов (излучение от солнца, переход температуры через 0 °С, атмосферная и производственная влажность). Описанные процессы в верхних слоях шламоотвалов приводят к медленной гидрата-

ции белита (Ca_2SiO_4) и карбонизации (образование CaCO_3).

В рамках исследования в данной статье принято допущение, что в рассматриваемых далее источниках пробы нефелинового шлама отбирались с поверхности (не глубже 0,5 м). Оно обусловлено отсутствием в работах информации о глубине отбора проб шламов и подтверждается характерным для приповерхностных условий химическим составом, то есть повышенным содержанием кальцита, который формируется в процессе выветривания на шламовых полях.

В работе [6] имеет место ограниченный ряд данных — характерные точки для свежего шлама, шлама кратковременного (1 мес.) и двухгодичного хранения. За этот промежуток времени содержание ларнита падает с 85 до 70 %, содержание кальцита растет с 5 до 20 %. Виден значительный рост потерь при прокаливании (п. п. п.) — с 4,47 до 8,29 %, при этом за месяц п. п. п. достигает 7,60 %, что говорит о быстром начальном этапе карбонизации.

В работе [18] представлены наиболее полные исследования с анализом фазовых составов за 20-летний период. Отмечается быстрая начальная скорость разложения ларнита (белита) в шламах — со 100 до 6,5 %

за указанный срок, при этом содержание кальцита возрастает до 91,79 %. Начальное значение п. п. п. составляет 3,60 %.

Автор исследования [19] рассматривает длительный период вылеживания нефелиновых шламов в шламоотвалах — 50 лет. Указывается медленная карбонизация (содержание ларнита снижается с 84,40 до 6,60 %, кальцит возрастает с 9,33 до 79,10 %).

Б. В. Белоусов в работе [11] сообщает, что количество п. п. п. за время хранения в шламохранилище вырастает в основном за счет увеличения содержания связанной воды и через пять лет достигает почти 17–20 %. За период 0–8 лет показан экспоненциальный рост п. п. п. с 6,78 до 21,47 % (рис. 1).

Благодаря собранным данным установлено предельное значение п. п. п., равное 23 %. Анализ автором данных по $R_{\text{сж}}$ образцов, твердевших 90 сут, при разных сроках лежалости в отвалах показал, что прочность при сжатии падает (рис. 2).

Следовательно, срок лежалости оказывает немаловажное влияние на прочностные показатели нефелиновых шламов.

На основании данных различных исследований [6, 11, 18, 19] выявлена количественная зависимость потерь при прокаливании (п. п. п.) от времени хранения шламов

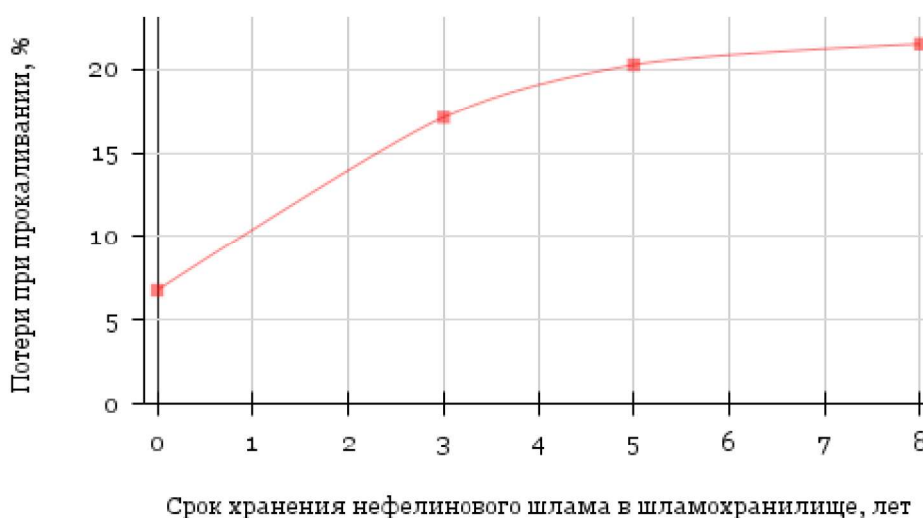


Рис. 1. Зависимость потерь при прокаливании от срока лежалости нефелинового шлама

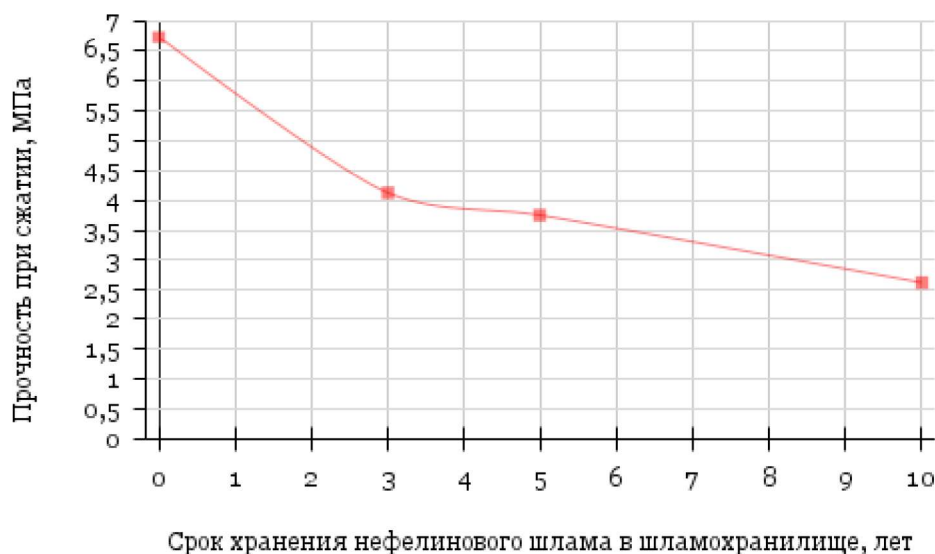


Рис. 2. Зависимость прочности при сжатии от срока лежалости нефелинового шлама

в шламоотвалах (t в годах) и содержания в них карбонатной фазы. Сформирована общая кинетическая модель, которая описывается уравнением (1) с предельным значением $\sim 23\%$, что соответствует практически полной карбонизации материала:

$$\text{п.п.п.} \approx 22,45 \left(1 - e^{(-0,235t)} \right). \quad (1)$$

Одновременно выявлена количественная связь между содержанием карбонатной фазы (в %) и потерями при прокаливании нефелиновых шламов — описывается соотношением (2). Формула позволяет предварительно рассчитать величину потерь при прокаливании по известному содержанию кальцита в белитовом шламе:

$$\text{п.п.п.} \approx 4,8 + 0,192 \cdot [\text{CaCO}_3]. \quad (2)$$

Достоверность уравнений проверена на данных других исследователей [20, 21] (табл. 3).

Для применения нефелиновых шламов в строительной практике важно понимать степень карбонизации и отметить момент перехода потенциальной пригодности материала в конструкции дорожной одежды в непригодность (предполагается, что этот момент наступает тогда, когда содержание новообразованного кальцита сравнивается

с содержанием остаточного ларнита). Нужно учитывать хронологический рубеж, после которого шлам можно считать в значительной степени карбонизированным. В связи с этим был проведен расчет точки пересечения графиков и соответствующего ей срока хранения.

Точка пересечения кривых приходится на 4,8 года, доля содержания кальцита и белита — около 51,8 % и п. п. п. равен 15,4 %. Совместный анализ кинетики фазовых превращений и реологических свойств демонстрирует, что критическим периодом, после которого эксплуатационная пригодность шламов существенно снижается, является срок до пяти лет, характеризующийся не только точкой пересечения кривых содержания ларнита и кальцита, но и переходом к необратимому падению прочности при сжатии [11], что делает материалы старше данного возраста непригодными. Рост значения потерь при прокаливании указывает на потерю активности нефелиновых шламов.

На основании анализа данных установлено, что прочность образцов из шлама на сжатие в 90-суточном возрасте имеет обратную зависимость от степени его карбонизации, которая интегрально характеризуется

Таблица 3

Таблица с исходными данными и результатами, полученными по формулам

Исследователь	Срок хранения шлама	Содержание белита (Ca_2SiO_4), %	Содержание кальцита (CaCO_3), %	п. п. п.	Расчетные данные по формулам и выводы
А. В. Ковалева, Л. Т. Денисова	Лежалый, 20 лет	13,97	86,03	Нет данных	По формуле (1): п. п. п. = 22,25 %, по формуле (2): п. п. п. = 21,32 %. Обобщенная модель дает хорошее приближение к независимым данным исследователей, что подтверждает ее адекватность
Р. Г. Еромасов	Свежий	46–86	5–40	1,5–5,9	По формуле (1) при $t = 0$: п. п. п. = 0 %, по формуле (2) при $[\text{CaCO}_3] = 5$ %: п. п. п. = 5,76 %. Наблюдается удовлетворительное соответствие по верхней границе экспериментальных данных (5,9 %), однако наличие начальных потерь свидетельствует о присутствии гидратных фаз и примесей, не учитываемых моделью
Р. Г. Еромасов	Лежалый	46–86	5–40	18,35	По формуле (1) при $t = 10$ лет: п. п. п. = 20,1 %, по формуле (2) при $[\text{CaCO}_3] = 40$ %: п. п. п. = 12,48 %. Модель по времени (1) показывает хорошую сходимость с экспериментальными данными, тогда как модель по составу (2) дает заниженное значение, что указывает на дополнительный вклад гидратных фаз в общие потери при прокаливании лежалых шламов

ростом содержания кальцита (CaCO_3) и потерь при прокаливании (п. п. п.). Предварительно данная зависимость может быть описана следующим соотношением:

$$R_{\text{сж}} \sim \frac{k[\text{Ca}_2\text{SiO}_4]}{[\text{CaCO}_3]_{\text{п.п.п.}}}, \quad (3)$$

где k — комплексный эмпирический коэффициент, учитывающий технологические факторы формовки и твердения образцов (влажность смеси, давление уплотнения, условия твердения), а также исходные свойства шлама (гранулометрический состав, минералогия).

Для предварительной проверки зависимости $R_{\text{сж}}$ от k и минералогического состава

вместе с п. п. п. был проведен расчет эмпирического коэффициента k на основе данных из табл. 2:

- для чистого шлама текущего производства [11] с $[\text{CaCO}_3] \approx 10,3$ % (вычисленным с помощью уравнения (2) через п. п. п.) и прочностью 6,72 МПа значение k составило ≈ 76 ;
- для шлама, который пролежал два года на шламоотвале [12], с $[\text{CaCO}_3] \approx 43$ % (также через график на рис. 1 выявлено значение п. п. п. и по уравнению (2) рассчитано содержание CaCO_3) и прочностью 5,6 МПа расчетное значение k составило ≈ 245 .

Столь значительный разброс (более чем в три раза) является прямым подтверждением

ем комплексной природы коэффициента k , который, как было предположено, интегрирует влияние технологических и исходных параметров. Соотношение (3) является примерным, так как для его уточнения и перехода от качественной к количественной прогнозной модели нужно провести комплекс многофакторных экспериментов, которые позволят адекватно оценить вклад каждого фактора ($k_1 \dots k_4$) в результирующий (комплексный) эмпирический коэффициент k :

k_1 — учитывает влажность шламовой смеси на плотность и структуру образца;

k_2 — учитывает параметры уплотнения образцов (время и давление);

k_3 — учитывает условия хранения при твердении образцов (температура и влажность среды);

k_4 — учитывает влияние гранулометрии нефелинового шлама на получение плотнейшей упаковки частиц материала.

Таким образом, проведенный анализ позволил предварительно установить корреляцию между сроком хранения шламов, их фазовым составом и прочностными характеристиками, а также провести классификацию

по степени их активности в соответствии с ОДМ 218.3.043–2015:

- высокоактивные нефелиновые шламы ($R_{сж} > 5$ МПа) характеризуются содержанием кальцита до 25 %, сроком хранения до трех лет, п. п. п. менее 12 %;

- активные нефелиновые шламы ($R_{сж} = 2,5–5$ МПа) — содержанием кальцита 25–50 %, сроком 3–8 лет, п. п. п. от 12 до 18 %.

Автором выдвинуто допущение, что в рассматриваемых источниках пробы нефелинового шлама отбирались на глубине до 0,5 м. Поэтому для верификации литературных данных проведен отбор проб с Пикалёвского шламохранилища на глубине от 0 до 1,5 м (рис. 3).

Прежде всего имеется необходимость в понимании процессов, происходящих на шламовом поле завода:

- 1) нефелиновый шлам в виде пульпы (жидкость : твердая часть $\approx 3 : 1 — 5 : 1$) по трубопроводу поступает в шламовый бассейн для оседания шлама (жидкость стекает);

- 2) шагающий экскаватор (драглайн) добывает ковшом осевший нефелиновый шлам и формирует конусы (рис. 4);



Рис. 3. Образец пробы нефелинового шлама

3) в дальнейшем шлам погрузчиком грузится в автосамосвалы для развозки по за-казчикам;

4) конусы могут находиться на шламовом поле долгое время (более 1 года) под снегом и в ситуации перепада температур, под воздействием солнечных лучей, ветров и дождя, что приводит к образованию защитной корки (схватившиеся зерна шлама за счет кальцита и гидратов) — эта корочка изолирует внутреннюю часть шламовых конусов от контакта с CO_2 и влагой, возникает эффект химической консервации по глубине конуса.

Был выполнен анализ отобранных проб для выявления значений п. п. п. (в муфельной печи при $950\text{ }^\circ\text{C}$) кальцита и белита с применением методов рентгенофазового анализа (РФА) (рис. 5) на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-3 (Буревестник)».

Далее были сформированы образцы и проведены работы по определению прочности на сжатие (рис. 6, табл. 4) образцов-цилиндров $d = h = 5\text{ см}$, уплотненных при оптимальной влажности $25 \pm 1\%$ и давлении

15 МПа в течение 3 мин (хранение при средней температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$ и средней влажности 95 % в течение 90 сут).

Суммируем вышесказанное. Формулы (1) и (2) выведены для шламов, длительно хранящихся на поверхности отвала (свободный доступ CO_2). Для глубинных проб эти модели неприменимы, так как п. п. п. в них обусловлен преимущественно гидратной водой, а не карбонатами. Формула (3) носит предварительный характер и требует дальнейшей верификации.

Выводы

Систематизирован и проанализирован массив разрозненных данных по прочности нефелиновых шламов, выявлена частичная несопоставимость.

Установлено, что действующая классификация в ОДМ 218.3.043–2015 не позволяет надежно прогнозировать свойства материала из-за фактора его естественного старения.

Обоснована необходимость введения в нормативную базу контроля показателя «потери при прокаливании» (п. п. п.) как оперативного критерия оценки пригодности шлама.



Рис. 4. Фотография конусов нефелинового шлама (по центру свежий, вдали слева — долгого хранения)

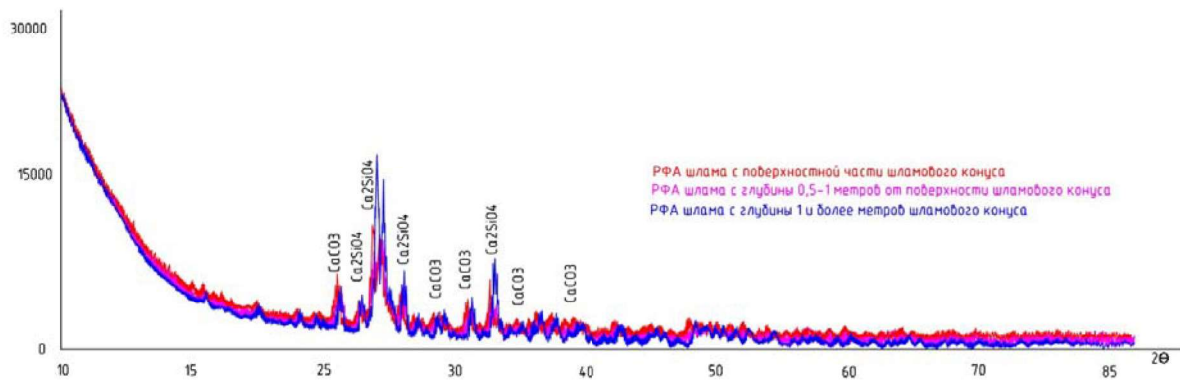


Рис. 5. Результаты рентгенофазового анализа шламов отобранных с разной глубины



Рис. 6. Образцы перед испытанием на пресс-машине

Таблица 4

Данные по пробам нефелинового шлама, отобранным из шламового конуса

№	Глубина, м	п. п. п., %	Кальцит до, %	Ларнит до, %	$R_{сж90}$, МПа
1	До 0,5	8,19	17,67	77,31	5,76
2	0,5–1,0	5,89	11,35	83,65	6,51
3	1,5	3,87	8,74	85,76	7,34

Сформулирована упрощенная корреляционная зависимость между п. п. п., сроком хранения, фазовым составом и прочностью.

Библиографический список

1. Бескровный В. М. Применение нефелинового шлама для строительства оснований автомобильных дорог в условиях Сибири: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 1983. 216 с.
2. Бочков Н. Н. Дорожно-строительные материалы на основе отходов глиноземного производства: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2016. 209 с.

3. Силецкий В. В. Обоснование технологии строительства лесных автомобильных дорог с применением нефелинового шлама, активированного добавками: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2024. 239 с.
4. Chatterjee A. K. High belite cements — Present status and future technological options: Part I // Cement and Concrete Research. 1996. Vol. 26 (8). Pp. 1213–1225. URL: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00099-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00099-3).
5. Потапова С. О. Экоотоксикологическая оценка почвогрунта придорожных территорий при использовании в строительстве автодорог нефелинового шлама: дис. ... канд. биол. наук. Томск, 2022. 147 с.
6. Шморгуленко Н. С., Корнеев В. И. Комплексная переработка и использование отвальных шламов гли-

ноземного производства. Сер.: Проблемы цветной металлургии. М.: Металлургия, 1982. 128 с.

7. Wagh A. S., Thompson B. A study of inter-particle bonds in dry bauxite waste resulting in atmospheric aerosols // *Physica Scripta*. 1988. Vol. 37 (2). 305. DOI 10.1088/0031-8949/37/2/020.

8. Wang M., Liu X. Applications of red mud as an environmental remediation material: A review // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 408. 124420. DOI 10.1016/j.jhazmat.2020.124420.

9. Cuesta A., Ayuela A., Aranda M. A. G. Belite cements and their activation // *Cement and Concrete Research*. 2021. Vol. 140. 106319. DOI 10.1016/j.cemconres.2020.106319.

10. Ларионова Н. А. Влияние шламохранилищ на загрязнение почв и подземных вод // *Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы: материалы 9-й междунар. науч.-практ. конф., посв. 80-летию Победы в Великой Отечественной войне. Севастополь — Воронеж, 10–13 сентября 2025 г.* Воронеж: ООО Типография «Кварта», 2025. С. 187–192.

11. Белоусов Б. В. Материалы для долговечных и экономичных оснований дорожных одежд. Омск: Изд-во СибАДИ, 2000. 157 с.

12. Клековкина М. П. Совершенствование конструкций и технологии строительства дорожных одежд с бетонным несущим основанием: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2010. 196 с.

13. Боженев П. И. Комплексное использование минерального сырья для производства строительных материалов. Л.; М.: Госстройиздат, 1983. 160 с.

14. Боженев П. И., Кудяков А. И. Эффективнее использовать нефелиновый шлам // *Цемент*. 1976. № 11. С. 18–20.

15. Боженев П. И., Кавалерова В. И. Нефелиновые шламы. М.; Л.: Стройиздат, 1966. 243 с.

16. Лыткин А. А., Старков Г. Б., Вагнер Е. Я. Исследование эффективности использования белитового шлама для устройства монолитных слоев дорожных одежд методом холодного ресайклинга // *Вестник Сибирского гос. автомобильно-дорожного ун-та*. 2020. Т. 17, № 6 (76). С. 764–776. DOI 10.26518/2071-7296-2020-17-6-764-776.

17. Lytkin A. A. Study of the Transport Loads Influence on the Nature of Belite Sludge Hardening in Pavement // *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 992. Pp. 79–85. DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.992.79.

18. Галкин М. А. Минеральный порошок из нефелинового шлама длительных сроков хранения // *Вестник Грозненского гос. нефтяного техн. ун-та. Технические науки*. 2024. Т. XX, № 2 (36). С. 75–86.

19. Ли Э. А. Т. Применение белитового шлама АГК (Ачинский глиноземный комбинат) в качестве источ-

ника получения пигмента типа «тауп» для производства краски типа «Мулино» // *Сб. тезисов докладов XIV Междунар. науч.-практ. конф. «Геология, прогноз, поиски и оценка месторождений алмазов, благородных и цветных металлов»*. Москва, 16–18 апреля 2025 г. М.: Центральный науч.-исслед. геологоразведочный ин-т цветных и благородных металлов, 2025. С. 482–484.

20. Ковалева А. В., Денисова Л. Т. Влияние нефелинового шлама на прочность асфальтобетона // *Труды Кольского научного центра РАН. Сер.: Технические науки*. 2024. Т. 15, № 1. С. 228–232.

21. Еромасов Р. Г. Композиционные керамические материалы на основе грубозернистого техногенного наполнителя: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2014. 154 с.

References

1. Beskrovniy V. M. *Primenenie nefelinovogo shlama dlya stroitel'stva osnovaniy avtomobil'nykh dorog v usloviyakh Sibiri*. Diss. kand. tekhn. nauk [The use of nepheline sludge for the construction of road foundations in Siberia. PhD in Sci. Tech. diss.]. Omsk, 1983, 216 p.

2. Bochkov N. N. *Dorozhno-stroitel'nye materialy na osnove otkhodov glinozemnogo proizvodstva*. Diss. kand. tekhn. nauk [Road construction materials based on alumina waste. PhD in Sci. Tech. diss.]. Tomsk, 2016, 209 p.

3. Siletskiy V. V. *Obosnovanie tekhnologii stroitel'stva lesnykh avtomobil'nykh dorog s primeneniem nefelinovogo shlama, aktivirovannogo dobavkami*. Diss. kand. tekhn. nauk [Justification of technology for construction of forest roads using additive-activated nepheline sludge. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2024, 239 p.

4. Chatterjee A. K. High belite cements — Present status and future technological options: Part I. *Cement and Concrete Research*, 1996, vol. 26 (8), pp. 1213–1225. Available at: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00099-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00099-3).

5. Potapova S. O. *Ekotoksikologicheskaya otsenka pochvogrunta pridorozhnykh territoriy pri ispol'zovanii v stroitel'stve avtodorog nefelinovogo shlama*. Diss. kand. biol. nauk [Ecotoxicological assessment of the soil of roadside areas when using nepheline sludge in road construction. PhD in Sci. Bio. diss.]. Tomsk, 2022, 147 p.

6. Shmorgunenkov N. S., Korneev V. I. *Kompleksnaya pererabotka i ispol'zovanie otval'nykh shlamov glinozemnogo proizvodstva. Ser.: Problemy tsvetnoy metallurgii* [Integrated processing and use of waste sludge from alumina production. Ser.: Problems of non-ferrous metallurgy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982, 128 p.

7. Wagh A. S., Thompson B. A study of inter-particle bonds in dry bauxite waste resulting in atmospheric

aerosols. *Physica Scripta*, 1988, vol. 37 (2), 305. DOI 10.1088/0031-8949/37/2/020.

8. Wang M., Liu X. Applications of red mud as an environmental remediation material: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 408. 124420. DOI 10.1016/j.jhazmat.2020.124420.

9. Cuesta A., Ayuela A., Aranda M. A. G. Belite cements and their activation. *Cement and Concrete Research*, 2021, vol. 140, 106319. DOI 10.1016/j.cemconres.2020.106319.

10. Larionova N. A. *Vliyanie shlamokhranilishch na zagryaznenie pochv i podzemnykh vod* [Influence of sludge storages on soil and groundwater pollution]. *Ekologicheskaya geologiya: teoriya, praktika i regional'nye problemy. Trudy 9-y mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoy 80-letiyu Pobedy v Velikoy Otechestvennoy voyne. Sevastopol' — Voronezh, 10–13 sentyabrya 2025 g.* [Environmental Geology: Theory, Practice, and Regional Issues. Proceedings of the 9-th International. sci.-pract. conf., dedicated to the 80-th anniversary of the Victory in the Great Patriotic War. Sevastopol - Voronezh, September 10–13, 2025]. Voronezh, OOO Tipografiya «Kvarta» Publ., 2025, pp. 187–192.

11. Belousov B. V. *Materialy dlya dolgovechnykh i ekonomichnykh osnovaniy dorozhnykh odezhd* [Materials for durable and economical bases of road pavements]. Omsk, SibADI Publ., 2000, 157 p.

12. Klekovkina M. P. *Sovershenstvovanie konstruksiy i tekhnologii stroitel'stva dorozhnykh odezhd s betonnyim nesushchim osnovaniem. Diss. kand. tekhn. nauk* [Improvement of structures and technology for the construction of road pavements with a concrete bearing base. PhD in Sci. Tech. diss.]. Volgograd, 2010, 196 p.

13. Bozhenov P. I. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov* [Complex use of mineral raw materials for the production of building materials]. Leningrad, Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1983, 160 p.

14. Bozhenov P. I., Kudyakov A. I. *Effektivnee ispol'zovat' nefelinoviy shlam* [It is more efficient to use nepheline sludge]. *Tsement – Cement*, 1976, no. 11, pp. 18–20.

15. Bozhenov P. I., Kavalerova V. I. *Nefelinovye shlamy* [Nepheline sludges]. Leningrad, Moscow, Stroyizdat Publ., 1966, 243 p.

16. Lytkin A. A., Starkov G. B., Vagner E. Ya. *Issledovanie effektivnosti ispol'zovaniya belitovogo shlama dlya*

ustroystva monolitnykh sloev dorozhnykh odezhd metodom kholodnogo resayklinga [Study of the effectiveness of using belite sludge for the construction of monolithic layers of road pavements by cold recycling]. *Vestnik Sibirskogo gos. avtomobil'no-dorozhnogo un-ta – Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University*, 2020, vol.17, no. 6 (76), pp. 764–776. DOI 10.26518/2071-7296-2020-17-6-764-776.

17. Lytkin A. A. Study of the Transport Loads Influence on the Nature of Belite Sludge Hardening in Pavement. *Materials Science Forum*, 2020, vol. 992, pp. 79–85. DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.992.79.

18. Galkin M. A. *Mineral'niy poroshok iz nefelinovogo shlama dlitel'nykh srokov khraneniya* [Mineral powder from nepheline sludge of long shelf life]. *Vestnik Groznenskogo gos. neftyanogo tekhn. un-ta. Tekhnicheskie nauki – Bulletin of the Grozny State Petroleum Engineering University. Technical sciences*, 2024, vol. XX, no. 2 (36), pp. 75–86.

19. Li E. A. T. *Primenenie belitovogo shlama AGK (Achinskii glinozemniy kombinat) v kachestve istochnika polucheniya pigmenta tipa «taup» dlya proizvodstva kraski tipa «Mulino».* *Trudy XIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Geologiya, prognoz, poiski i otsenka mestorozhdeniy almazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallov»*, Moskva, 16–18 aprelya 2025 g. [Use of AGK (Achinsk alumina plant) belite sludge as a source of production of Taup pigment for the production of Mulino type paint. Proceedings of the XIV International scientific-practical. conf. “Geology, forecast, search and evaluation of deposits of diamonds, precious and non-ferrous metals”, Moscow, April 16-18, 2025]. Moscow, Tsentral'niy nauch.-issled. geologorazvedochniy in-t tsvetnykh i blagorodnykh metallov Publ., 2025, pp. 482–484.

20. Kovaleva A. V., Denisova L. T. *Vliyanie nefelinovogo shlama na prochnost' asfal'tobetona* [Influence of nepheline sludge on asphalt concrete strength]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical Sciences*, 2024, vol.15, no. 1, pp. 228–232.

21. Eromasov R. G. *Kompozitsionnye keramicheskie materialy na osnove grubozernistogo tekhnogennogo napolnitelya. Diss. kand. tekhn. nauk* [Composite ceramic materials based on coarse-grained technogenic filler. PhD in Sci. Tech. diss.]. Krasnoyarsk, 2014, 154 p.