

УДК 625.731.625.85.06
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-422-435>
EDN: PWQXQS
Научная статья



ОПЫТ СТРОИТЕЛЬСТВА МОНОЛИТНЫХ СЛОЕВ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ВОЗДУХА

А. А. Лыткин

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

alex.lytkin2016@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2557-0502>

АННОТАЦИЯ

Введение. Повышение долговечности дорожных конструкций и продление строительного сезона по устройству монолитных слоев дорожных одежд являются актуальными задачами. Особый интерес при этом представляют дорожные одежды нежесткого типа. Замена оснований из зернистых материалов (щебень, гравий и т. п.) на монолитные позволяет снизить материалоемкость дорожной одежды на 20–50%, стоимость строительных работ до 45% и повысить срок службы дорог в 1,5–2 раза. Продление строительного сезона по устройству монолитных оснований способствует повышению темпов строительства, более рациональному использованию дорожно-строительной техники, закреплению на предприятии высококвалифицированных специалистов и уменьшению накладных расходов. Особый интерес при этом представляют многотоннажные отходы, обладающие самостоятельными вяжущими свойствами, например белитовые шламы глиноземного производства. Статья посвящена комплексному исследованию физико-механических и технологических свойств натурального белитового шлама с целью использования его для устройства монолитных слоев дорожных и аэродромных одежд в зимний период, без введения противоморозных добавок.

Материалы и методы. Термозлектрическим методом установлена температура начала замерзания белитового шлама минус 2 °С. Изучена его уплотняемость в интервале отрицательных температур, способность к восстановлению разрушенной структуры после повторного уплотнения, закономерности остывания материала в процессе технологических операций по устройству конструктивных слоев в зимний период. Уплотняемость изучали путем прессования образцов из шлама оптимальной влажности при его температурах от 20 до минус 10 °С. Исследование процессов структурообразования шлама и шламощебеночного материала заключалось в изучении кинетики твердения образцов, хранящихся в климатических камерах, моделирующих изменение среднемесячных температур воздуха в годовом цикле (от 20 °С до минус 20 °С) и в естественных условиях (на открытом воздухе). Параллельно выполнялись термографические и электронно-микроскопические исследования новообразований в твердеющем материале. Для изучения закономерностей остывания шламовых слоев провели лабораторный эксперимент, моделирующий двухстороннее (сверху и снизу) промораживание материала в климатической камере при температурах минус 10, минус 15 и минус 25 °С.

Результаты. Выявлен комплекс уникальных физико-химических и технологических свойств натурального белитового шлама, заключающихся: в сохранении исходной плотности и активности после замораживания, способности шлама и шламощебеночного материала к твердению при отрицательных температурах, пониженной температуре замерзания минус 2 °С, хорошей уплотняемости в интервале отрицательных температур (до минус 6 °С). Исследованы температурно-технологические параметры заготовки шлама для производства работ в зимнее время. Изучены закономерности остывания шлама в технологическом процессе по устройству конструктивных слоев в зимний период. Разработана технология устройства монолитных слоев дорожных одежд из белитового шлама и шламощебеночного материала при отрицательных температурах воздуха до минус 20 °С. Обобщен практический опыт применения белитового шлама при строительстве дорог во II–IV дорожно-климатических зонах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: белитовый шлам, метод раннего замораживания, медленно твердеющее вяжущее, шламощебеночный материал, зимний период, теплопотери, удобоукладываемость, критическая температура.

Статья поступила в редакцию 27.04.2022; одобрена после рецензирования 24.05.2022; принята к публикации 10.06.2022.

© Лыткин А. А., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Лыткин А. А. Опыт строительства монолитных слоев дорожных одежд при отрицательных температурах воздуха // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 3 (85). С. 422-435. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-422-435>

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-422-435>

EDN: PWQXQS

Original article

EXPERIENCE IN CONSTRUCTION OF MONOLITHIC ROAD PAVEMENTS AT SUB-ZERO AIR TEMPERATURES

A. A. Lytkin

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),

Omsk, Russia

alex.lytkin2016@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2557-0502>

ABSTRACT

Introduction. Increasing the durability of road structures and extending the construction season for the installation of monolithic road pavements are urgent tasks. Non-rigid road pavements are of particular interest. Replacing the bases of granular materials (crushed stone, gravel, etc.) with monolithic ones reduces the material consumption of the road surface by 20-50%, the cost of construction works by up to 45% and increases the service life of roads by 1.5-2 times. The extension of the construction season for the installation of monolithic bases contributes to an increase in the pace of construction, a more rational use of road construction equipment, securing highly qualified specialists at the enterprise and reducing overhead costs. A multi-tonnage waste having independent binding properties is of particular interest, for example, belite sludge of alumina production. The article is devoted to a comprehensive study of the physical mechanical and technological properties of natural belite sludge in order to use it for the making of monolithic layers of road and airfield pavement in winter, without the introduction of antifreeze additives.

Materials and methods. The freezing temperature of the belite sludge of minus 2 ° C was determined by the thermoelectric method. Its compactibility in the range of negative temperatures, the ability to restore the destroyed structure after re-compaction, the regularities of cooling of the material during technological operations for the construction of structural layers in winter are studied. The compaction was studied by pressing samples from sludge of optimal humidity, at its temperatures from 20 to minus 10°C. The study of the processes of structure formation of sludge and sludge crushed stone materials consisted in studying the kinetics of hardening of samples stored in climatic chambers that simulate changes in average monthly air temperatures in an annual cycle (from 20°C to minus 20°C) and in natural conditions (outdoors). In parallel, thermographic and electron microscopic studies of neoplasms in the hardening material were performed. To study the regularities of the cooling of the sludge layers, a laboratory experiment was conducted that simulates two-way (top and bottom) freezing of the material in a climatic chamber at temperatures of minus 10, minus 15 and minus 25°C.

Results. A complex of unique physical chemical and technological properties of natural belite sludge has been identified, which consist in maintaining the initial density and activity after freezing, the ability of sludge and sludge crushed stone materials to harden at negative temperatures, a reduced freezing temperature of minus 2°C, good compaction in the range of negative temperatures (up to minus 6°C). The temperature and technological parameters of the sludge preparation for the production of works in winter are investigated. The regularities of sludge cooling in the technological process for the construction of structural layers in winter are studied. A technology has been developed for the making of monolithic layers of the road pavement made of belite sludge and crushed stone materials at negative air temperatures up to minus 20°C. The practical experience of the belite sludge use in the construction of roads in 2-4 road-climatic zones is summarized.

KEYWORDS: belite sludge, early freezing method, slow-hardening binder, sludge crushed stone material, winter period, heat loss, remoldability, critical temperature.

© Lytkin A. A., 2022



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

The article was submitted 27.04.2022; approved after reviewing 24.05.2022; accepted for publication 10.06.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Lytkin A. A. Experience in construction of monolithic layers of road pavement at sub-zero air temperatures. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (3): 422-435. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-422-435>

ВВЕДЕНИЕ

Одним из путей повышения долговечности дорожных конструкций является строительство монолитных оснований дорожных одежд. Срок службы нежестких дорожных одежд с монолитными основаниями из материалов, обработанных минеральными вяжущими, в 1,5–2,0 раза больше, чем с основаниями из дискретных материалов [1, 2]. Рост темпов строительства дорог существенно сдерживается из-за сезонного характера устройства таких оснований. В настоящее время детально исследованы и опробованы на практике методы строительства цементобетонных и цементогрунтовых оснований при отрицательных температурах воздуха¹ [3]. Принцип реализации этих методов заключается в создании благоприятных тепловлажностных условий для набора материалом критической прочности, после достижения которой он может быть заморожен. Это осуществляется путем применения специальных мер: введением в смеси противоморозных добавок, утеплением уложенных слоев теплоизоляционными материалами, электропрогревом и т. п. Указанные методы не нашли достаточно широкого внедрения в дорожной отрасли, так как они энергоемки, низкопроизводительны, значительно удорожают и усложняют работы². В 60-х годах прошлого столетия была предложена технология устройства цементобетонных оснований способом раннего замораживания [4]. Принципиальное отличие этого способа от традиционных заключается в том, что не создаются условия для набора бетоном критической прочности, а смесь укладывается на мерзлый подстилающий слой и заморажива-

ется до начала схватывания цемента, то есть до образования жестких кристаллических связей в материале. Однако проверочные исследования, проведенные НИИЖБ, показали, что в производственных условиях осуществить такую технологию без потерь прочности и морозостойкости бетона невозможно, так как материал не успевает замерзнуть до начала схватывания цемента [5]. Для предотвращения потери прочности бетона необходимо повторное вибрирование смеси после ее оттаивания [6]. Качественное вибрирование бетона выполнить очень сложно, так как оттаивание его происходит тоже медленно и после оттаивания он никогда не бывает по всему сечению слоя в пластическом состоянии.

Следовательно, для эффективного использования способа раннего замораживания необходимо значительно удлинить сроки схватывания и твердения материала, чтобы дать ему возможность полностью замерзнуть и оттаивать до потери пластических свойств, то есть до начала кристаллообразования. Осуществить это можно, заменив портландцемент медленнотвердеющим бесклнкерным вяжущим, например шлаковым³ [7]. Особый интерес при этом представляет белитовый шлам – многотоннажный отход глиноземного производства, который без дополнительного измельчения, за счет высокого содержания белита (C₂S), обладает свойствами грубодисперсного медленнотвердеющего вяжущего. Многолетний производственный опыт подтвердил высокую техническую и экономическую эффективность использования этого материала при строительстве монолитных слоев дорожных и аэродромных одежд при положительных температурах воздуха⁴ [8]. Однако не востребо-

¹ Пособие по строительству покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов из грунтов, укрепленных вяжущими материалами, к СНиП 3.06.03-85 и СНиП 3.06.06-88 Минтрансстрой СССР. М.: Союздорнии, 1990. 203 с.

² Доклады от СССР XIV Международному конгрессу (Прага, 1971 г.). М.: Транспорт, 1973. 180 с.

³ Белоусов Б. В., Асматулаев Б. А. Твердение шлаковых вяжущих на морозе // Строительство и эксплуатация дорог в условиях Сибири: Межведомственный сборник. НИСИ, СИБАДИ. Новосибирск: НИСИ, 1978 С. 102 –109.

⁴ Методические рекомендации по устройству дорожных оснований и переходных покрытий с применением белитового шлама в нефтегазоносных районах Западной Сибири. Минтрансстрой СССР. М.: Союздорнии, 1986. 28 с.

ванные запасы этого отхода на шламоотвалах предприятий алюминиевой промышленности России составляют сотни миллионов тонн. На сегодняшний день только на АО «РУСАЛ Ачинск» объемы белитового шлама (нефелинового) составляют примерно 220 млн т. при ежегодном поступлении на шламоотвал 6–7 млн т. Разработка зимней технологии устройства монолитных слоев дорожных одежд с применением шлама без противоморозных добавок требует научного обоснования.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Дать теоретическое обоснование возможности применения белитового шлама для устройства монолитных слоев дорожных одежд в зимний период.

2. Изучить процессы структурообразования шлама и шламощебеночных материалов при отрицательных температурах.

3. Изучить закономерности остывания шлама при его заготовке, длительном хранении и технологическом процессе конструктивных слоев дорожных одежд при отрицательных температурах воздуха.

4. Осуществить опытно-экспериментальное строительство монолитных слоев дорожных одежд с применением белитового шлама при отрицательных температурах воздуха и разработать практические рекомендации.

СВОЙСТВА БЕЛИТОВОГО ШЛАМА

Белитовый шлам образуется при производстве глинозема (оксида алюминия) из нефелиновых и бокситовых руд способом спекания. Из спека путем гидротермального выщелачивания выделяют глинозем, а пескообразный полупродукт шлам по шламопроводу подается в отвал.

В результате технологического процесса производства глинозема происходит частичная гидратация шламовых зерен с образованием на их поверхности оболочек гидратов, находящихся преимущественно в гелевидном состоянии. В зависимости от перерабатываемой руды белитовый шлам подразделяют на нефелиновый и бокситовый [9]. В данной статье представлены материалы по использованию нефелинового шлама.

Таблица 1
Физико-механические свойства нефелинового шлама текущего производства
Источник: составлено автором.

Table 1
Physical and mechanical properties of nepheline sludge of current production
Source: compiled by the author.

Наименование свойств	Показатели
Модуль крупности	1,2–1,7
Истинная плотность	2,91–3,04 г/см ³
Насыпная плотность во влажном состоянии, кг/м ³	900–1100
Удельная площадь поверхности	300–750 см ² /г
Микропористость	35–60% при размере пор от 10 до 1000 мкм
Коэффициент теплопроводности при стандартной плотности, Вт/(м×К)	0,57–0,66
Оптимальная влажность, %	23–26
Средняя плотность в уплотненном состоянии при оптимальной влажности под нагрузкой 15 МПа, т/м ³	1,8–1,85
Предел прочности на сжатие, МПа: - сразу после уплотнения под нагрузкой 15 МПа; - через 90 сут; - через 1 год	1,0–1,2 4,0–6,0 9,0–10,0
Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа: - через 90 сут; - через 1 год	1,6–2,4 2,6–3,0

По фазовому составу нефелиновый шлам представляет в основном смесь силикатов, гидросиликатов (20–30%) и гидроалюминатов кальция (3–5%), гидроферритов, карбонатов. Содержание C₂S в шламе составляет 70–85%. Следовательно, шлам является полимерным материалом с преобладающим содержанием белита полиаморфной формы β, сцементированного массой гидратов. Фракционный состав шлама характеризуется преобладающим содержанием фракций 0,315–0,5 мм и 0,08–0,315 мм, в сумме превышающих 50% массы.

Физико-механические свойства шлама представлены в таблице 1.

Белит придает шламу способность омоноличиваться в момент уплотнения во влажном состоянии и увеличивать свою прочность в течение многих лет [10].

Приведенные данные свидетельствуют о том, что нефелиновый шлам в рядовом виде (без дополнительного измельчения) уплотненный при оптимальной влажности (22–26%) по показателям прочности, при нормативном сроке твердения для медленноотвердевающих вяжущих 90 сут, соответствует маркам от М40 до М60. При этом сохраняется тенденция к дальнейшему набору прочности за счет большого резерва негидратированного вяжущего [9].

Исследование процессов структурообразования белитового шлама и влияния отрицательных температур на его технологические свойства

Непременным условием качественного строительства в зимний период является удобоукладываемость материала в процессе всех технологических операций по устройству конструктивного слоя, а также сохранение им требуемой плотности и способности к твердению после морозного воздействия. Поэтому для разработки зимней технологии необходимо было исследовать процессы структурообразования шлама и шламощебеночного материала при отрицательных температурах. Установить температуру замерзания шлама, изучить его уплотняемость в интервале отрицательных температур, способность к восстановлению разрушенной структуры после повторного уплотнения, закономерности остывания в процессе заготовки, длительного хранения и технологических операций по устройству конструктивных слоев в зимний период.

Изучение процессов структурообразования шлама и шламощебеночного материала включало: изучение влияния морозного воздействия на плотность свежесуспензированных мате-

риалов; изучение кинетики их твердения при различных температурных режимах и влияние подвижных нагрузок на характер твердения.

Влияние морозного воздействия на плотность шлама и шламощебеночного материала изучали путем фиксации изменения объема образцов после замораживания с помощью специально сконструированного прибора. При проведении эксперимента использовали методы математического планирования. Плотность материала после замораживания характеризовали коэффициентом разрыхления (Кр).

$$Kp = \frac{\gamma_{ск}^I}{\gamma_{ск}}, \quad (1)$$

где $\gamma_{ск}$ – наибольшая плотность материала до замораживания, г/см³;

$\gamma_{ск}^I$ – плотность материала после замораживания, г/см³.

Коэффициент разрыхления (выходной параметр) является функцией трех основных факторов: влажности материала (15–24%), его начальной плотности (1,34–1,6) и температуры замораживания (минус 5 – минус 50 °С).

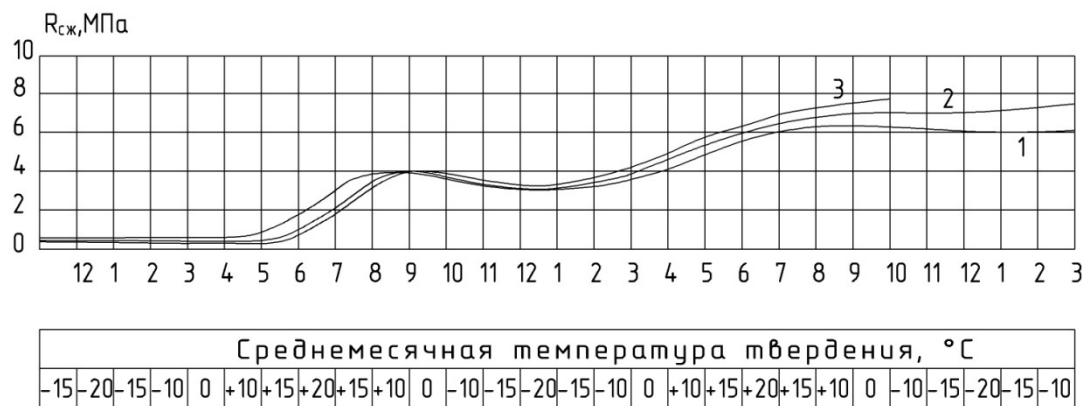
Результаты эксперимента показали, что Кр снижается максимум на 0,01, что свидетельствует о незначительном разуплотнении шлама после замораживания. Причем разуплотняются только образцы с минимальной плотностью и максимальной влажностью (Кр = 0,99). При стандартной плотности, при любых значениях влажности и температуры замораживания образцы практически не разуплотняются. Кр шламощебеночных образцов во всех опытах равен 1,0. Данный эффект объясняется наличием на поверхности шламовых зерен оболочек гидратов, находящихся преимущественно в гелевидном состоянии. По аналогии с механизмом замерзания и твердения цементных растворов и бетонов, замороженных на стадии формирования коагуляционной структуры в период коллоидации цемента, гидратные оболочки воспринимают на себя давление от замерзшей воды и сжимаются. Зерна при этом остаются в первоначальном положении и материал не разуплотняется [11]. Напряжения, возникающие под действием кристаллизационного давления, должны также существенно снижаться за счет отжимания части незамерзшей воды в резервные поры, так как шлам обладает высокой микропористостью, 35–60% (см. таблицу 1).

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что слои дорожной одежды из белитового шлама и шламощебеночного материала, уплотненные до

требуемой плотности в зимний период, нет необходимости специально повторно уплотнять после их оттаивания весной.

Для изучения кинетики твердения шлама по стандартной методике изготавливались и испытывались образцы – балочки размером 4×4×16 см. Образцы хранили при следующих температурных режимах: в нормальных условиях при температуре 20 ± 2 °С (контрольные образцы); в климатических камерах, моделирующих изменение среднемесячных температур воздуха в годовом цикле (от 20 °С до минус 20 °С), по данным метеостанций районов предполагаемого строительства (Красноярск, Омск, Тюмень, Томск и Новосибирск); в естественных условиях (на открытом воздухе) в г. Омске. Образцы разных серий отличались

исходной влажностью 15, 23 и 28%. Температурные режимы твердения образцов в климатических камерах принимали для моделирования строительства в весенних условиях по марту, апрелю, осенних – октябрю, ноябрю, а зимнего периода по январю и февралю. Кинетику твердения шламщебеночного материала изучали на образцах-цилиндрах диаметром и высотой 10,1 см, изготовленных из диабазового и шлакового щебня, укрепленного шламом при дозировках от 5 до 45%. После испытания образцов отбирали пробы на влажность, а также для термографических и электронно-микроскопических исследований. Фрагменты результатов изучения кинетики твердения шлама и шламщебеночного материала представлены на рисунках 1, 2.



Исходная влажность образцов: 1 – 15%; 2 – 23%; 3 – 28%.

Рисунок 1 – Изменение во времени предела прочности при сжатии образцов нефелинового шлама, твердевших в естественных условиях с декабря
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Change in time of compressive strength of samples of nepheline sludge hardened in natural conditions since December
Source: compiled by the author.

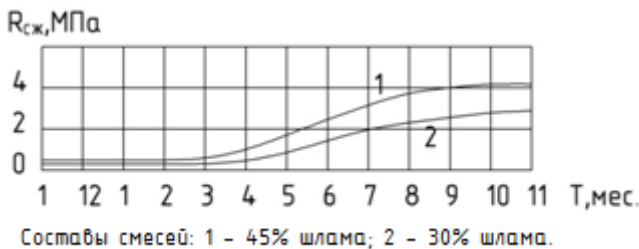


Рисунок 2 – Изменение во времени предела прочности при сжатии шламщебеночных образцов, твердевших в естественных условиях с декабря
Источник: составлено автором.

Figure 2 – The change in time of the compressive strength limit of slurry samples that have hardened under natural conditions since December
Source: compiled by the author.

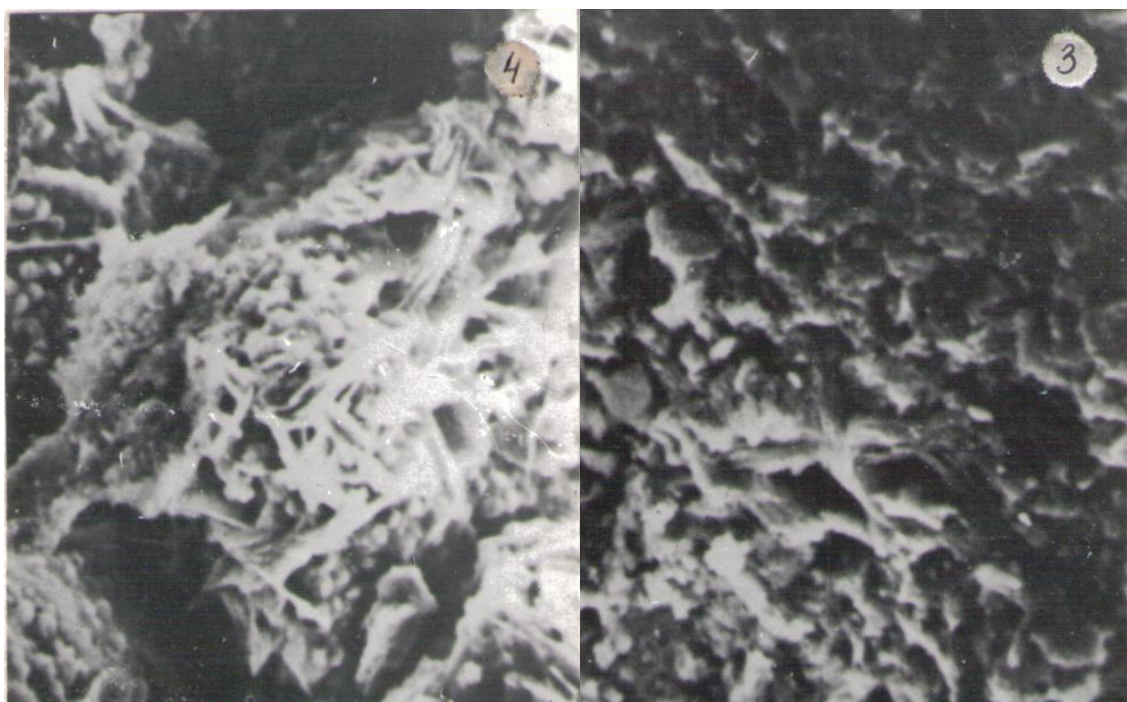


Рисунок 3 – Микрофотографии скола образцов нефелинового шлама, твердевших в естественных условиях в течение 18 месяцев (увеличение 500 и 1000)
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Micrographs of nepheline sludge cleavage that hardened in vivo for 18 months (magnification 500 and 1000)
Source: compiled by the author.

Испытания образцов на сжатие и растяжение при изгибе показали, что в начальный период твердения в диапазоне отрицательных температур прочность материала остается постоянной. Однако результаты термографических и электронно-микроскопических исследований свидетельствуют, что в этот период процессы гидратации в шламе не прекращаются, а происходит накопление гелевидных новообразований. Морфология затвердевшей массы в образцах из нефелинового шлама характеризуется наличием игольчатых и тонкопластинчатых гидросиликатов типа тобермарита и других C–S–H (рисунок 3). Следует отметить, что при твердении в естественных условиях, а значит продолжительное время при отрицательных температурах, гелевидной фазы значительно больше, чем в образцах, твердевших в нормальных условиях. Кроме того, эти новообразования характеризуются более высокой удельной поверхностью и

степенью переплетения [6]. О накоплении гелевидных новообразований свидетельствуют также результаты термографических исследований. Этот факт объясняет интенсивный набор прочности образцов с наступлением положительных температур (см. рисунки 1, 2). Через три месяца твердения при положительных температурах материал набирает прочность, соответствующую марке М40, что подтверждает правильность гипотезы о способности белитового шлама сохранять вяжущие свойства после морозного воздействия⁵.

С наступлением второго зимнего периода прочность образцов начинает снижаться, но уже в феврале (с повышением температуры до минус 15 °С) она вновь возрастает и через 2-3 месяца твердения при отрицательных температурах достигает своего первоначального максимума и превышает его (см. рисунок 1). Установлено, что на третий год падения прочности в зимний период нет и материал

⁵Лыткин А. А. Применение белитового шлама для устройства слоев дорожных одежд при отрицательных температурах: автореферат дис. канд. техн. наук : 05. 23. 11 / А. А. Лыткин. 1990. 18 с.

твердеет даже при минус 20 °С. Кроме того, результаты термографических исследований свидетельствуют о том, что гидравлическая активность шлама исчерпана не полностью.

Сравнение прочностных показателей образцов из смесей шлама с диабазовым и шлаковым щебнем свидетельствует о том, что прочность образцов из шламошлаковых смесей в 1,5–2,0 раза выше (см. рисунок 2). Это объясняется проявлением вяжущих свойств шлака, активированного шламом [7, 8].

В результате изучения способности шлама и шламощебеночного материала к восстановлению разрушенной структуры после повторного уплотнения и исследования влияния многократных подвижных нагрузок на характер твердения этих материалов при испытании на кольцевом испытательном стенде (полигоне) в условиях, максимально приближенных к натурным, установлено, что переформовка и подвижные нагрузки положительно влияют на характер твердения шлама и шламощебеночного материала [12, 13].

Материал после переформовки твердеет интенсивнее, и его прочность через шесть месяцев в 1,2 раза выше прочности контрольных образцов (6,4 МПа против 5,3 МПа). Установлено, что через год эксплуатации конструктивных слоев на полигоне общий модуль упругости на секциях, находящихся под движением электромобилей, увеличился в 1,13–1,64 раза по сравнению с контрольными секциями. Прочность кернов тоже выше на 33,8% у шлама и на 38,8% у шламощебеночного материала.

Следовательно, в период весеннего оттаивания нет необходимости прекращать движение транспорта по слоям, устроенным с применением белитового шлама в зимний период, достаточно ограничить его скорость до 30 км/ч с регулировкой движения по всей ширине слоя.

Исследования влияния отрицательных температур на технологические свойства шлама включали определение температуры его замерзания и изучение уплотняемости в интервале отрицательных температур.

Температуру начала замерзания шлама определяли термоэлектрическим методом с использованием теории планирования эксперимента. В эксперименте варьировались влажность от 15 до 26%, плотность скелета от 1,35 до 1,6 г/см³ и содержание водорастворимых щелочных соединений от 0,32 до 0,52%. На основании данных эксперимента установлена температура начала замерзания белитового шлама минус 2 °С.

Уплотняемость изучали путем прессования образцов из шлама оптимальной влажности под стандартной нагрузкой 15 МПа в течение 3 мин при его температуре от 20 до минус 10 °С. Уплотняемость характеризовалась коэффициентом уплотнения (K_u), который определяли как отношение плотности материала после уплотнения при заданной температуре к его стандартной плотности. Установлено, что с понижением температуры уплотняемость снижается, но даже при минус 6 °С K_u составляет 0,98, что отвечает нормативным требованиям для дорожных оснований.

При температурах до минус 2 °С включительно шлам уплотняется также, как при положительных, что с учетом установленной температуры начала его замерзания является основанием принять температуру минус 2 °С за критическую.

Теплотехнические расчеты по теплотеплам шлама в процессе его транспортирования по железной дороге в полувагонах думкарного типа, в автосамосвалах, а также при длительном хранении в штабеле выполняли методом конечных элементов с использованием комплекса программ для расчета нестационарного нелинейного поля в трехмерной постановке.

Установлено, что шлам может быть использован для устройства оснований в зимнее время при условии нахождения его в думкарах не более:

- трех суток при средней (за время транспортирования) температуре воздуха (T_v) минус 10 °С и начальной температуре шлама в момент окончания погрузки $T_n = 5$ °С;
- 1,5 сут при средней T_v минус 20 °С и $T_n = 10$ °С;

- 1 сут при средней T_v минус 30 °С и $T_n = 15$ °С. Шлам, находящийся в думкарах более продолжительное время, будет иметь среднюю температуру ниже критической (минус 2 °С) и его целесообразно вывозить в притрассовый штабель и использовать в летний период.

Расчеты показали, что при транспортировании шлама в большегрузном автомобиле с кузовом, обогреваемым выхлопными газами, его температура понижается незначительно, а при низких (до 2 °С) начальных температурах материала его среднетемпературная температура даже повышается на 0,1–1,2 °С.

Анализ рассчитанных температурно-технологических параметров хранения шлама в штабеле показал, что при условии заготовки материала в летнее время и утеплении поверхности штабеля, например быстротверде-

ющим пенопластом (БТП) толщиной 20–25 см, материал сохраняет удобоукладываемость в течение всего зимнего периода.

Для изучения закономерностей остывания шламовых слоев провели лабораторный эксперимент, моделирующий двухстороннее (сверху и снизу) промораживание материала. Шлам оптимальной влажности (25%) при заданных начальных температурах T_n – 0, 10, 20 °С помещали в асбестовые колонки диаметром 14 см и высотой h – 7, 15, 25, 35 см, которые устанавливали на замороженное грунтовое основание и теплоизолировали по всей боковой поверхности. Колонки проморажива-

ли в климатической камере при температурах T_b – 10, 15 и 25 °С.

Анализ результатов эксперимента показал, что наиболее интенсивно происходит охлаждение верхней части колонок. Поэтому за допустимый интервал времени (t) принято время, затраченное на охлаждение верхней части колонок от заданной начальной температуры до ее критического значения минус 2 °С. По данным эксперимента, согласно методике, позволяющей аппроксимировать экспериментальные точки гиперболическими кривыми, получена эмпирическая зависимость

$$t = [(-6,19 \times 10^{-3} \times T_n^2 + 0,4673 \times T_n + 2,07) \times T_b^{-2} + 5,25 \times 10^{-5} \times T_n^2 + 5,75 \times 10^{-4} \times T_n + 0,008] \times h^{1,3}. \quad (2)$$

Для удобства определения значений t данную зависимость номограммировали (рисунок 4).

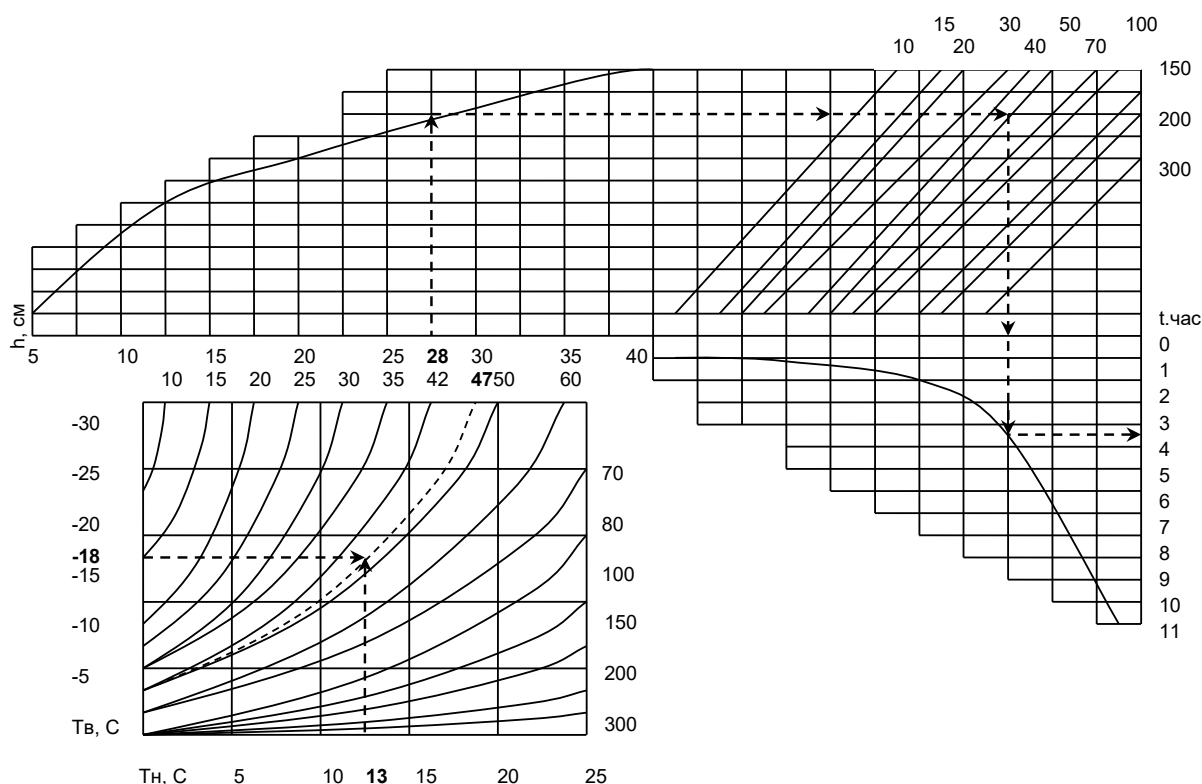


Рисунок 4 – Номограмма для определения допустимого интервала времени на проведение технологических операций по устройству слоя дорожной одежды из белитового шлама при отрицательных температурах воздуха
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Nomogram for determining the permissible time interval for carrying out technological operations for the construction of a road pavement layer from belite sludge at sub-zero air temperatures.
Source: compiled by the author.

На номограмме пунктирными линиями показан пример определения t при следующих исходных данных: начальная температура шлама $T_n = 13^\circ\text{C}$, температура воздуха $T_v = 18^\circ\text{C}$, толщина шламового слоя в рыхлом теле $h = 28$ см, d – безразмерный параметр, определяемый с использованием значений T_n и T_v . В данном примере интервал времени получился 3 ч 20 мин.

ОПЫТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Опытные-экспериментальные работы выполняли с целью производственной проверки и уточнения результатов теоретических и экспериментальных исследований. Строительство опытных участков оснований и покрытий переходного типа из шлама и шламощебеночных материалов выполняли во II–IV дорожно-климатических зонах, на дорогах I–IV категорий при температурах воздуха до минус 26°C .

Результаты наблюдения за теплопотерями шлама в процессе его транспортирования в автосамосвалах подтвердили правильность теплотехнических расчетов. Например, при опытно-экспериментальном строительстве дороги «Подъезд к заводу костной муки» в Омской области шлам доставлялся автотранспортом в зимний период за 450 км и был в полном объеме использован для устройства основания при отрицательных температурах воздуха. Подогрев кузовов выхлопными газами не только существенно сдерживал остывание материала, но и предотвращал его примерзание к внутренней поверхности кузовов.

При строительстве в зимний период основания из нефелинового шлама под бетонное покрытие на дороге II категории Омск – Новосибирск шлам доставлялся по железной дороге за 750 км до станции Каргат в полувагонах думкарного типа и затем автосамосвалами за 20–25 км на дорогу. Шлам распределялся автогрейдером слоем толщиной 35 см (с запасом на уплотнение) и уплотнялся пневмокатком массой 25 т. За 14–16 проходов катка по одному следу удалось добиться требуемого коэффициента уплотнения 0,98–1,0. Все работы выполнялись при температурах воздуха минус 10 – 26°C . Всего с января по март было построено 5,7 км основания из шлама.

В целом следует отметить принципиальную сходимость результатов изучения теплопотерь шлама при его перевозке железнодорожным и автомобильным транспортом в производственных условиях с результатами теплотехнических расчетов. Например, у партии шлама, доставляемого в течение 2,5 сут железнодорожным транспортом в зимнее время, температура понизилась всего на $2,75^\circ\text{C}$, ее среднее значение после выгрузки из думкаров составило $8,7^\circ\text{C}$ и весь материал (48 думкаров) был использован для устройства основания при отрицательных температурах.

По аналогичной схеме доставки шлама при отрицательных температурах было построено 4,6 км основания под бетонное покрытие на рулевых дорожках ВПП–2 Международного аэропорта Толмачево (г. Новосибирск).

В процессе опытного строительства и производственного внедрения выявлена высокая эффективность обработки щебеночного основания белитовым шламом методом пропитки-вдавливания с помощью кулачкового катка ДУ-26⁶ [14]. Удалось добиться качественной обработки щебеночного слоя толщиной 18 см на всю толщину за 12–14 проходов катка по одному следу при коэффициенте уплотнения шламощебеночного материала 1,0–1,04. Причем высокое удельное давление катка позволяло выполнять работы при температурах шлама ниже его критического значения минус 3 – 7°C , что позволяло без ущерба качеству существенно удлинить технологическую захватку. Кроме того, по такому основанию, как показал производственный опыт, можно сразу открывать движение транспорта без ограничения его скорости. Этот эффект широко использовался при строительстве покрытий переходного типа на нефтепромысловых дорогах.

Результаты наблюдения за теплопотерями шлама в процессе опытного строительства и производственного внедрения подтвердили достоверность теоретических и экспериментальных исследований. Самые большие теплопотери зафиксированы в процессе уплотнения материала, так как после распределения по мерзлоте основанию значительно увеличивается площадь его теплоотдачи. Поэтому крайне важным представляется определение допустимого интервала времени (t) на проведение данной операции и допустимой длины технологической захватки (L). Решаю-

⁶ А. С. 960348, СССР. М. Кл. ³ Е 01 С 3/00. Способ возведения дорожного и аэродромного основания / Бескровный В. М. [и др.] (СССР). № 2926211 / 29 – 33; Заявлено 13. 05. 80; Оpubл. 23. 09. 82. Бюл. № 35. 1982. 118 с.

щее значение при этом оказывают следующие факторы: температура шлама и воздуха, скорость ветра, толщина и ширина укладываемого слоя и производительность ведущей машины (катка).

Длина технологической захватки ориентировочно может быть определена для конкретных условий строительства в начале каждой смены по формуле

$$L = \frac{\Pi}{h \times b} \times t, \quad (3)$$

где Π – часовая производительность катка, м³/ч;

h – толщина слоя в плотном теле, м;

b – ширина уплотняемого слоя, м;

t – допустимый интервал времени на выполнение технологических операций (ч), определяемый по номограмме (см. рисунок 4).

Значения расчетных интервалов времени (t), определенных по номограмме (см. рисунок 4) с данными натурных наблюдений, представлены в таблице 2.

Сравнение значений t , определенных по номограмме с данными натурных наблюдений, показало, что в производственных условиях времени на распределение и уплотнение слоя шлама получается на 5–10% больше, что вполне допустимо для практических целей и идет в запас надежности.

Правильность разработанных технических решений проверена путем строительства и обследования опытных участков, а также в ходе

производственного внедрения при строительстве сотен километров дорог I–IV категорий, во II–IV дорожно-климатических зонах, в Красноярском крае, Омской, Новосибирской, Томской и Павлодарской областях [15,16].

Неоднократное детальное обследование показало, что конструктивные слои из шлама и шламощебеночного материала сформировались в прочный монолит, не уступающий по прочностным показателям аналогичным материалам на прилегающих участках, построенных в летний период. Установлено, что предел прочности на сжатие материалов, отобранных с опытных участков, составляет 7,5–14,5 МПа. При этом с годами отмечается тенденция к постоянному медленному набору прочности. Например, модуль упругости основания из белитового шлама, построенного в зимний период на автомобильной дороге «Подъезд к заводу костной муки», через 33 года эксплуатации увеличился в 2,9 раза [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании теоретических, физико-химических исследований и физико-механических испытаний выявлен комплекс специфических свойств нефелинового шлама, заключающихся в сохранении исходной плотности и активности после замораживания на стадии формирования коагуляционной структуры, и установлена способность шлама и шламощебеночных материалов к твердению при отрицательных температурах.

Таблица 2
Значения t , определенные по номограмме и результатам замера температур шлама в производственных условиях
Источник: составлено автором.

Table 2
Values of t determined from the nomogram and the results of measuring the temperatures of the sludge in production conditions
Source: compiled by the author.

№ опытного участка	Исходные параметры				Значение допустимого интервала времени t , ч	
	$T_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{н}}, ^\circ\text{C}$	h , см	V , м/сек	по номограмме	по данным опытного строительства
1	-26	11	30	5–6	2,5	2,7
3	-12	4	18	4–6	1,5	1,6
4	-7	1	22	4–9	3,1	3,3

Исследованы температурно-технологические параметры заготовки шлама для производства работ в зимнее время. Изучены закономерности остывания шлама в технологическом процессе по устройству конструктивных слоев в зависимости от его начальной температуры, температуры воздуха и толщины слоя, что дало возможность обосновать допустимый интервал времени на выполнение технологических операций и с учетом производительности ведущей машины – катка определять длину технологической захватки. Разработан эффективный способ устройства шламощебеночных оснований (покрытий) с применением кулачкового катка, позволяющий добиваться требуемой плотности материала при отрицательных температурах воздуха. Исследованы температурно-технологические параметры заготовки шлама для производства работ в зимний период и даны рекомендации по защите притрассовых штабелей из шлама быстротвердеющим пенопластом, что обеспечивает сохранение материала в талом состоянии весь зимний период. Разработаны рекомендации по технологии устройства монолитных оснований (покрытий) на дорогах I–IV категорий из шлама и шламощебеночных материалов при отрицательных, до минус 20 °С температурах воздуха^{7,8,9}. Правильность разработанных технических решений проверена путем строительства и обследования опытных участков, а также в ходе производственного внедрения при массовом строительстве дорог во II–IV дорожно-климатических зонах. По прочностным показателям слои дорожных и аэродромных одежд, устроенные в зимний период, удовлетворяют требованиям действующих нормативных документов.

Широкое применение белитового шлама позволяет значительно продлить дорожно-строительный сезон, сократить дефицит каменных материалов и традиционных вяжущих, снизить материалоемкость дорожных и аэродромных одежд, повысить их несущую способность и долговечность, а также улучшить экологическую обстановку.

Направление дальнейших исследований:

- разработка технологии холодного рециклинга асфальтобетонных покрытий с заменой традиционных вяжущих на белитовый шлам, в том числе в зимний период;
- разработка технологии строительства оснований из грунтов, укрепленных шламом, в том числе в зимний период.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безрук В. М. Укрепление грунтов в дорожном и аэродромном строительстве. М.: Транспорт, 1971. 247 с.
2. Fohs D., Kinter E. Soil-Portland cement twickness design-summary of current practices. Public Roads. 1970. Vol. 36. No. 4. pp. 75-82.
3. Миронов С. А. Теория и методы зимнего бетонирования. М.: Стройиздат, 1975. 700 с.
4. Хигерович М. И., Муштаева Н. Е., Карасев М.С. Устройство бетонного покрытия способом раннего замораживания // Автомобильные дороги. 1969. № 9. С. 4–5.
5. Крылов Б. А., Иванова О. С., Сергеев К. И. [и др.] Свойства бетона, замороженного в раннем возрасте // Автомобильные дороги. 1972. № 11. С. 14–16.
6. Миронов С. А., Глазырина Е. Г. Влияние раннего замораживания на прочностные и деформативные характеристики бетона. Зимнее бетонирование и тепловая обработка бетона. М.: Стройиздат, 1975. 125 с.
7. Пополов А. С. Опыт применения гранулированных шлаков в дорожном строительстве Франции // Экспресс-информация. Автомобильные дороги. Зарубежный опыт. ЦНТИ Минавтодора РСФСР. Вып. 10. М., 1984. С. 1–13.
8. Белоусов Б. В., Бескровный В. М., Лыткин А. А. Применение белитовых шламов для устройства дорожных оснований в условиях Сибири. Производство и применение каменных материалов из горных пород и отходов промышленности в дорожном строительстве. Тр. Союздорнии. М., 1984. С. 43–48.
9. Логинова И. В., Кырчиков А. В. Аппаратно-технологические схемы в производстве глинозема. Екатеринбург: Урфу, 2011. 233 с.
10. Белоусов Б. В., Гаврилов А. Н., Афонин А. С. Предложения по конструированию дорожных одежд с повышенным сроком службы. Мир дорог. М., 2016. 2 с.

⁷ Методические рекомендации по укреплению грунтов и других материалов медленнотвердеющими вяжущими при пониженных положительных и отрицательных температурах. Минтрансстрой СССР. М.: Союздорнии, 1985. 33 с.

⁸ ВСН 84 – 89 Изыскания, проектирование и строительство автомобильных дорог в районах распространения вечной мерзлоты. М.: Минтрансстрой, 1990. 271 с.

⁹ ОДМ 218.3.043–2015. Методические рекомендации по применению в слоях дорожных одежд натуральных белитовых шламов. Росавтодор Министерства транспорта Российской Федерации. Информавтодор. Издан на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 30.11.2015. № 2283. Р. с., М. 66 с.

11. Кириенко И. А. Теоретическое обоснование твердения цементных растворов и бетонов на морозе. Киев, 1962. 30 с.

12. Влияние повторного уплотнения и транспортных нагрузок на характер твердения белитового шлама в слоях дорожных одежд // Вестник СибАДИ. 2017; 3: 125–132. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3\(55\)-125-132](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3(55)-125-132)

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

14. Бескровный В. М., Белоусов Б. В., Лыткин А. А. Обработка щебеночных оснований вяжущими с помощью кулачкового катка. Производство и применение каменных материалов из горных пород и отходов промышленности в дорожном строительстве. Тр. Союздорнии. М., 1984. С. 93–102.

15. Лыткин А. А., Старков Г. Б., Вагнер Е. Я. Исследование эффективности использования белитового шлама для устройства монолитных слоев дорожных одежд методом холодного ресайклинга // Вестник СибАДИ. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-764-776>

16. Левин Б. В., Лисюк Б. С., Луценко К. Л., Лыткин А. А. [и др.] Нефелиновые концентраты и шламы – уникальное сырье для геополимерных материалов и конструкций. Мир дорог. «Экология. Новые технологии». М., 2020. 9 с.

REFERENCES

1. Bezruk V.M. *Ukreplenie gruntov v dorozhnom i azerodromnom stroitel'stve* [Soil reinforcement in road and airfield construction]. Moscow: Transport, 1971. 247 p. (in Russ.)

2. Fohs D., Kinter E. Soil-Portland cement twickness design-summary of current practices. Public Roads. 1970. Vol. 36. no 4. pp. 75-82.

3. Mironov S.A. *Teoriya i metody zimnego betonirovaniya* [Theory and methods of winter concreting] Moscow: Strojizdat, 1975. 700 p. (in Russ.)

4. Higerovich M. I., Mushtaeva N. E., Karasev M. S. *Ustrojstvo betonogo pokrytija sposobom rannego zamorazhivaniya* [Making of a concrete coating by the method of early freezing] *Avtomobil'nye dorogi*. 1969; 9: 4-5. (in Russ.)

5. Krylov B. A., Ivanova O. S., Sergeev K. I. i dr. *Svoystva betona zamorozhennogo v rannem vozraste* [Properties of concrete frozen at an early age]. *Avtomobil'nye dorogi*. 1972; 1: 14-16. (in Russ.)

6. Mironov S. A., Glazyrina E. G. *Vlijanie rannego zamorazhivaniya na prochnostnye i deformativnye harakteristiki betona. Zimnee betonirovanie i teplovaja obrabotka betona* [The effect of early freezing on the strength and deformation characteristics of concrete. Winter concreting and heat treatment of concrete] Moscow: Strojizdat, 1975. 125 p. (in Russ.)

7. Popolov A. S. *Opyt primeneniya granulirovannyh shlakov v dorozhnom stroitel'stve Francii* [Experience in the use of granular slag in road construction in

France] *Jekspress - informacija. Avtomobil'nye dorogi. Zarubezhnyj opyt*. Moscow: CBNTI Minavtodor RSFSR, no 10, 1984. pp. 1-13. (in Russ.)

8. Belousov B. V., Beskrovnyj V. M., Lytkin A. A. *Primenenie belitovyh shlamov dlja ustrojstva dorozhnyh osnovanij v uslovijah Sibiri. Proizvodstvo i primenenie kamennyh materialov iz gornyh porod i othodov promyshlennosti v dorozhnom stroitel'stve* [The use of belite sludge for the construction of road foundations in Siberia. Production and application of stone materials from rocks and industrial waste in road construction] Moscow: Sojuzdornii, 1984. pp. 43-48. (in Russ.)

9. Loginova I. V., Kyrchikov A. V. *Apparatno – tehnologicheskie shemy v proizvodstve glinozema* [Hardware and technological schemes in the production of alumina] Ekaterinburg: Urfu, 2011, 203 p. (in Russ.)

10. Belousov B. V., Gavrilov A. N., Afonin A. S. *Predlozheniya po konstruirovaniyu dorozhnyh odezhd s povyshennym srokom sluzhby* [Proposals for the design of road clothes with an extended service life]. *Mir dorog* 2016. 2 p. (in Russ.)

11. Kirienko I. A. *Teoreticheskoe obosnovanie tverdeniya cementnyh rastvorov i betonov na moroze* [Theoretical justification of hardening of cement mortars and concrete in the cold] Kyiv, 1962. 30 p. (in Russ.)

12. Lytkin A.A. Influence of repeated compaction and transport loads on the character of hardening of belitic sludge in layers of road clothes. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017;(3(55)):125-132. (In Russ.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3\(55\)-125-132](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3(55)-125-132)

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

14. Beskrovnyj V. M., Belousov B. V., Lytkin A. A. *Obrabotka shhebenochnyh osnovanij vjazhushhimi s pomoshh'ju kulachkovogo katka. Proizvodstvo i primeneniye kamennyh materialov iz gornyh porod i othodov promyshlennosti v dorozhnom stroitel'stve* [Processing of crushed stone bases with binders using a cam roller. Production and application of stone materials from rocks and industrial waste in road construction] Moscow: Sojuzdornii, 1984. pp. 93-102. (in Russ.)

15. Lytkin A. A., Starkov G. B., Vagner E. Ja. *Issledovanie jeffektivnosti ispol'zovaniya belitovogo shlama dlja ustrojstva monolitnyh sloev dorozhnyh odezhd metodom holodnogo resajklinga* [Investigation of the effectiveness of the use of belite sludge for the making monolithic layers of road clothes by cold recycling]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020. no 17(6). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-764-776>

16. Levin B. V., Lisjuk B. S., Lucenko K. L., Lytkin A.A. i dr. *Nefelinovye koncentraty i shlamy – unikal'noe syr'e dlja geopolimernyh materialov i konstrukcij* [Nepheline concentrates and sludges are unique raw materials for geopolymer materials and structures]. *Mir dorog*. 2020: 9. (in Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Лыткин Александр Александрович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Aleksandr A. Lytkin – Cand. of Sci., Senior Researcher, Associate Professor of the Road Construction and Maintenance Department.