

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2026, Том 13, № 2 / 2026, Vol. 13, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/15SATS226.pdf>

DOI: 10.15862/15SATS226 (<https://doi.org/10.15862/15SATS226>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Буренин, В. В. Переработка и применение нефтешламов в дорожном строительстве: технологические решения и многокритериальный подход к оценке / В. В. Буренин, А. В. Катаржин, А. А. Котов // Транспортные сооружения. — 2026. — Т. 13. — № 2. — URL: <https://t-s.today/PDF/15SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/15SATS226.

For citation:

Burenin V.V., Katarzhin A.V., Kotov A.A. Processing and application of oil sludge in road construction: technological solutions and a multi-criteria assessment approach. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2026;13(2): 15SATS226. Available at: <https://t-s.today/PDF/15SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/15SATS226. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 625.7/.8:665.6/.7.002.68

Буренин Владислав Валентинович

ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»,
Москва, Россия

Профессор кафедры «Транспортные установки»

Кандидат технических наук, профессор

E-mail: madi.1965@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=549252

Катаржин Александр Владимирович

ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»,
Москва, Россия

Доцент, заведующий кафедрой «Транспортные установки»

Доктор технических наук, доцент

E-mail: ralfets@yandex.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=703365

Котов Андрей Александрович

ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»,
Москва, Россия

Доцент кафедры «Изыскания и проектирование дорог»

Кандидат технических наук

E-mail: gt@madi.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6855-0688>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=689703

Переработка и применение нефтешламов в дорожном строительстве: технологические решения и многокритериальный подход к оценке

Аннотация. Переработка нефтешламов для дорожного строительства рассматривается как задача управляемого вовлечения неоднородного нефтесодержащего сырья в состав дорожных материалов при обязательном контроле его состава, технологической подготовленности и экологической безопасности. Нефтешлам не может использоваться как универсальный заменитель дорожного битума из-за изменчивого содержания воды, минеральных примесей, асфальтосмолистых веществ, серы, полициклических ароматических углеводородов и тяжёлых

металлов. Предложена последовательность принятия инженерного решения, еральных примесей, асфальтосмолистых веществ, серы, полициклических ароматических углеводородов и тяжёлых металлов. Предложена последовательность принятия инженерного решения, включающая паспортизацию партии, предварительную сепарацию и стабилизацию, разделение выходных фракций по назначению, лабораторную проверку дорожно-механических свойств, контроль выщелачивания и опытную эксплуатацию. Органическая фракция рассматривается как ограниченный омолаживающий или пластифицирующий компонент для смесей с асфальтогранулятом, а твёрдые нефтесодержащие остатки — как компонент укрепленных грунтов и органоминеральных слоёв. Показано, что область применения определяется не происхождением отхода, а совокупностью показателей конкретной партии и требованиями конструктивного слоя. Для верхних слоёв покрытия необходимы повышенные требования к совместимости, водостойкости, колееобразованию и эмиссиям при нагреве; для оснований и рабочего слоя земляного полотна критичны прочность, морозостойкость и выщелачивание. Сформированы алгоритм выбора направления использования и контрольная матрица, позволяющие перейти от декларативной утилизации к подтверждённой инженерной пригодности нефтешлама. Контрольная матрица также пригодна для последующей цифровой проверки паспортов сырья и протоколов испытаний. Отдельно обоснована перспективность локальной подготовки сырья для Арктической зоны и районов Крайнего Севера, где логистические ограничения усиливают значение вторичных местных материалов.

Ключевые слова: нефтешламы; дорожное строительство; асфальтогранулят; укрепленные грунты; органоминеральные смеси; Арктическая зона; экологическая безопасность; выщелачивание; оценка жизненного цикла; искусственный интеллект

Введение

Строительство автомобильных дорог связано со значительным потреблением дорожно-строительных материалов и затратами на их доставку. Замещение части традиционного сырья промышленными отходами может снижать потребность в природных материалах и транспортные затраты, если вторичный материал удовлетворяет требованиям конкретного конструктивного слоя [1].

Добыча, транспортировка и переработка нефти сопровождаются образованием нефтесодержащих отходов, а накопленные нефтешламы остаются значимой экологической проблемой. Обзор состояния проблемы в Российской Федерации показывает разнообразие источников образования нефтешламов и необходимость применения разных методов их обезвреживания и переработки [2].

Наличие отдельных патентных решений не устраняет основную инженерную проблему — высокую вариативность состава нефтешламов. Содержание воды, минеральных примесей, асфальтосмолистых веществ, парафинов, серы, полициклических ароматических углеводородов и тяжёлых металлов зависит от происхождения, условий хранения и срока накопления. Поэтому нефтешлам следует рассматривать не как стандартный заменитель битума, а как переменное вторичное сырьё, требующее паспортизации, технологической подготовки и проверки пригодности для конкретного конструктивного слоя дорожной одежды [3].

Нефтешламы представляют собой многокомпонентные смеси нефтепродуктов, воды и механических примесей. Их физико-химические свойства зависят от исходного сырья, условий образования и хранения. По происхождению выделяют, в частности, придонные, резервуарные, грунтовые и буровые нефтешламы. Органическая часть некоторых нефтешламов содержит тяжёлые углеводородные и смолисто-асфальтеновые компоненты. Это создаёт предпосылки для дорожного применения, но не отменяет контроля содержания воды, минеральных примесей и потенциально опасных компонентов [3].

В зависимости от состава и свойств нефтешламы используются в дорожном строительстве в следующих направлениях:

- при производстве асфальтобетонных смесей;
- в качестве вяжущего для укрепления грунтов;
- в качестве вяжущего для получения органоминеральных смесей.

Использование нефтешламов в строительных материалах требует предварительной стабилизации или фракционирования, подбора дозировки и контроля физико-механических свойств. Для близких по природе нефтесодержащих буровых отходов, включённых в асфальтовый материал, экспериментально показана необходимость учитывать долговременное выщелачивание тяжёлых металлов [4]. Обзор асфальтовых покрытий с вторичными материалами подтверждает значимость контроля миграции полициклических ароматических углеводородов и тяжёлых металлов [5]. Выбор способа применения вторичного сырья должен быть увязан с функцией конкретного конструктивного слоя и технологией его устройства [6].

Экспериментальные данные подтверждают возможность ограниченного использования нефтешлама в асфальтовом материале при подборе дозировки [7] и его применения как омолаживающего компонента в горячих смесях с асфальтогранулятом [8]. Для таких смесей отдельно оценивают влагостойкость и сопротивление колееобразованию [9]. При холодном ресайклинге критичен подбор количества вяжущего [10], а свойства асфальтогранулобетона зависят от состава и характеристик переработанного материала [11]. Исследования по валоризации нефтешлама показывают восстановление реологических свойств состаренного вяжущего и зависимость эффекта от дозировки и состава смеси [12]. Переход от лабораторных результатов к практическому применению требует опытной проверки.

Для снижения риска переноса результатов между неоднородными партиями сырья использована система критериев «паспортизация — подготовка — целевое применение». Она формализована в виде алгоритма выбора направления использования и матрицы контрольных показателей (рис. 2, табл. 1). Последовательность оценки начинается с характеристики и подготовки нефтешлама, после чего пригодные фракции сопоставляются с требованиями конкретных конструктивных слоёв и ремонтных технологий. Рисунок 1 представляет один из вариантов технологической подготовки, а рисунок 2 и таблица 1 задают порядок отбора и контроля.

Технологические основы подготовки нефтешламов

Для переработки нефтяных шламов и ловушечных нефтей на товарную нефть, а также на сырьё, потенциально пригодное для производства асфальтовых и иных дорожных материалов, разработан способ переработки [13], включающий следующие основные операции:

- предварительный прогрев и забор нефтяного шлама или ловушечной нефти;
- сепарация от основного количества механических примесей и их эвакуация;
- окислительное или окислительно-каталитическое превращение жидкой части отсепарированного нефтяного шлама или ловушечной нефти;
- закалка продуктов реакции (охлаждение);
- сепарация товарной нефти от газа, воды и остатка примесей.

В соответствии со способом переработки технологическая схема установки для переработки нефтяных шламов и ловушечных нефтей представлена на рисунке 1.

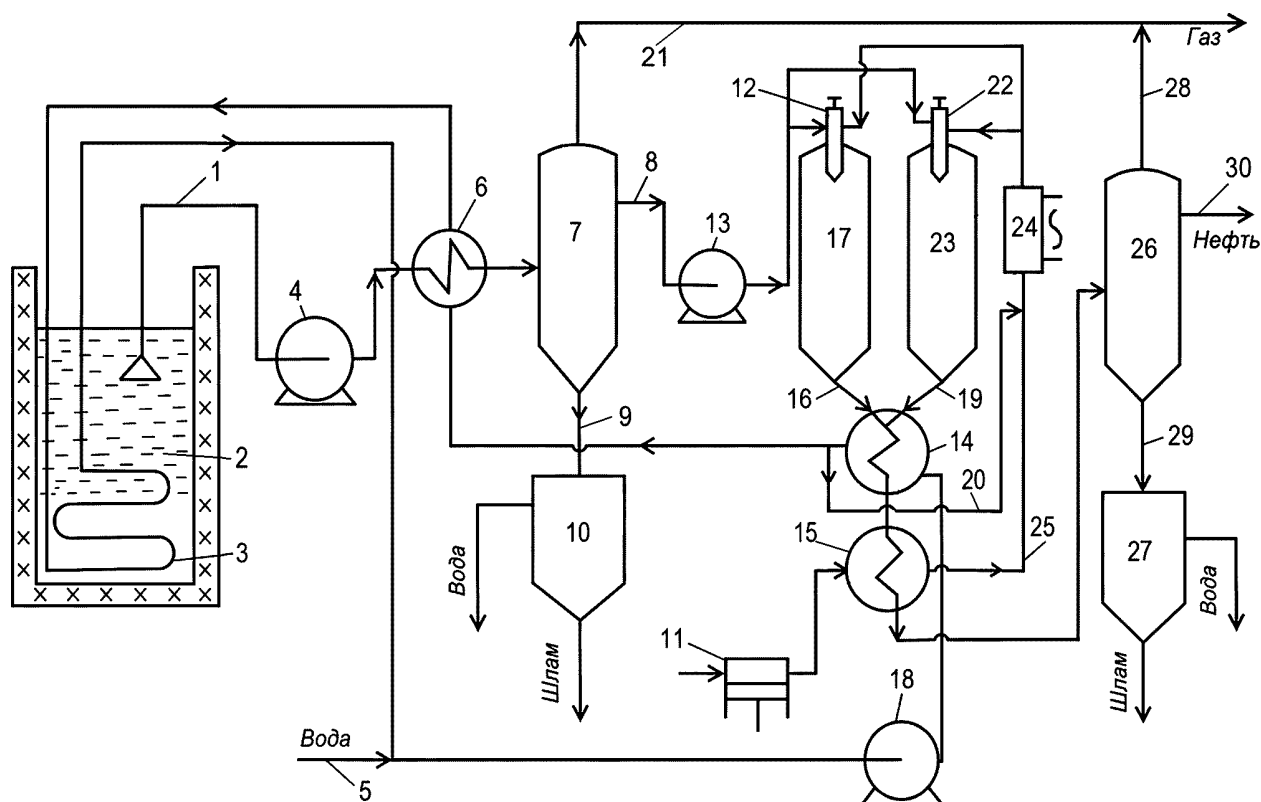


Рисунок 1. Схема установки для переработки нефтяных шламов и ловушечных нефтей на товарную нефть и сырьё для производства асфальта (адаптировано по [13])

Согласно схеме на рисунке 1, установка включает амбар 2 для хранения сырья, представляющего собой нефтяной шлам или ловушечную нефть, соединённый трубопроводом 1 сырья с насосом 4, теплообменником 6 и сепаратором 7 сырья. Сепаратор 7 соединён трубопроводом 9 отстоя с отстойником 10, трубопроводом 8 отсепарированной жидкой фазы — с насосом 13 и форсунками 12 и 22 сдвоенного реактора 17 и 23, а также снабжён выкидным трубопроводом 21 газа. К форсункам 12 и 22 подведён воздухопровод 25, соединённый с компрессором 11, теплообменником 15, электропечью 24 и трубопроводом 20 подачи пара в воздушную линию. Реакторы 17 и 23 соединены газопроводами 16 и 19 с парогенератором 14, теплообменником 15 и сепаратором 26 товарной нефти. Сепаратор товарной нефти 26 соединён трубопроводом 29 с отстойником-сепаратором 27, трубопроводом 28 с выкидным трубопроводом 21 газа, а также снабжён трубопроводом 30 отвода товарной нефти. Водопровод 5 соединён с насосом 18, парогенератором 14, теплообменником 6 и теплообменником 3 подогрева шлама.

Такая конфигурация оборудования реализует нагрев, предварительное отделение воды и механических примесей, окислительное превращение жидкой нефтяной фазы и последующее разделение продуктов [13]. Для дорожного применения схема важна прежде всего как пример технологической подготовки сырья. Патентное решение не нормирует получаемую жидкую фазу как дорожное вяжущее, поэтому её пригодность для асфальтовых материалов должна устанавливаться отдельными испытаниями.

Установка работает следующим образом.

Нефтяной шлам или ловушечную нефть в амбаре 2 подогревают с помощью теплообменника 3. Пар в теплообменник 3 подают из парогенератора 14, при этом часть тепла пара теряется в теплообменнике 6. Острый пар для подогрева нефтяного шлама или ловушечной нефти может подаваться из парогенератора 14 или заводской сети. Подогретый нефтяной шлам или ловушечную нефть по трубопроводу 1 сырья подают насосом 4 через

теплообменник 6, где сырьё дополнительно подогревают до температуры 60–100°C и далее в сепаратор 7 сырья. В сепараторе 7 происходит отделение основной части механических примесей до 95–97 %, отделение основной части воды до 70–80 %, отделение газа и нефтяной жидкой фазы.

Отделённые механические примеси и воду по трубопроводу отстоя 9 перепускают в отстойник 10. Газ направляют в выкидной трубопровод 21. Отсепарированную нефтяную жидкую фазу насосом 13 по трубопроводу отсепарированной жидкой фазы 8 нагнетают в форсунки 12 и 22 сдвоенного реактора 17 и 23. В эти же форсунки 12 и 22 компрессором 11 по воздухопроводу 25 нагнетают воздух, который подогревают в теплообменнике 15 и электропечи 24. Перед электропечью 24 в воздухопровод нагнетают пар из трубопровода 20.

Соотношение между нефтяным шламом или ловушечной нефтью, воздухом и водяным паром составляет соответственно 1:(0,2–0,3):(0,05–0,15) мас. Водяной пар считается суммарно из оставшейся воды в нефтяном шламе (ловушечной нефти) и нагнетаемого пара. В реакторах 17 и 23 жидкую фазу распыляют нагретыми до температуры 400–500°C воздухом и водяным паром. Под действием температуры, воздуха и водяного пара жидкая нефтяная фаза подвергается окислительному крекингу. Часть нефти окисляется, повышая температуру до 450–650°C. Продолжительность окислительного крекинга составляет 0,5–6 с. При этом давление в реакторной зоне может повышаться до 10 атм.

Продукты реакции в газообразном виде поступают на закалку (охлаждение) по газопроводам 16 и 19 в теплообменники 14 и 15. Теплообменник 14 выполняет функцию парогенератора, поскольку в нём продукты реакции охлаждают водой, нагнетаемой насосом 18. Часть получаемого пара направляют в линию подачи воздуха до электропечи 24, а часть — на нагрев сырья в амбаре 2 и теплообменнике 6. После окончательного охлаждения в теплообменнике 15 продукты реакции в газовой и жидкой фазе подают в сепаратор 26 товарной нефти, где происходит окончательное разделение на газ, направляемый по трубопроводу 28 в выкидной трубопровод 21 газа, на товарную нефть, направляемую в трубопровод 30 отвода товарной нефти, и на механические примеси и воду, направляемые по трубопроводу 29 в отстойник-сепаратор 27. Газ из выкидного трубопровода 21 может расходоваться на технологические нужды, а механические примеси и водно-минеральный остаток должны направляться на дальнейшую обработку или использоваться в составе органо-минеральных смесей только после дополнительного контроля загрязнений.

Перед подачей в реакторы 17 и 23 отсепарированную жидкую фазу допускается смешивать с водорастворимыми солями металлов переменной валентности: железа, хрома, никеля, кобальта, вольфрама и др. В способе [13] эти соли используются для окислительно-каталитической обработки. Их количество составляет 0,02–0,5 мас. % в пересчёте на активный металл от массы жидкой фазы. Если применяемая соль содержит, например, 10 % активного металла, расчётный расход соли составляет 0,2–5,0 мас. % от жидкой фазы.

Применение солей металлов переменной валентности в [13] является вариантом окислительно-каталитической обработки, однако состав продукта как дорожного вяжущего в патенте не нормирован. Поэтому после такой обработки необходимо определять фактический состав жидкой фазы, её вязкость, содержание воды и совместимость с битумом. Использование солей хрома, никеля и кобальта дополнительно требует контроля остаточного содержания металлов и их возможного выщелачивания [5].

Схема [13] не является типовой для всех нефтешламов. По составу оборудования, наличию реакторной зоны с повышенной температурой и давлением, теплообменников, газоотводящей линии и сепараторов она технически ближе к стационарной или модульной установке на производственной базе, чем к мобильному комплексу на строительной площадке.

Её мобильное применение ограничивается требованиями промышленной безопасности, энергоснабжения и контроля газовых выбросов. При этом в патентной схеме предусмотрены выходы товарной нефти, газа, воды и остатка примесей; отдельный поток тяжёлой органической фракции, пригодной как битумный компонент, не выделен. Поэтому дорожное назначение любого нефтесодержащего выхода должно подтверждаться по его фактическому составу и свойствам.

Дальнейшие направления дорожного применения рассматриваются независимо от того, получено ли нефтесодержащее сырьё именно по схеме [13]. Для асфальтовых материалов, укрепленных грунтов и ремонтных композиций требуется собственный набор технологических и экологических проверок, соответствующий функции конструктивного слоя.

Результаты и обсуждение

После технологической подготовки нефтесодержащего сырья направления применения целесообразно разделять по функции конструктивного слоя. Практическая реализуемость органоминеральных смесей в дорожной одежде подтверждается опытом их применения в конструктивных слоях [14]. При переносе такого решения на нефтесодержащее сырьё необходимо дополнительно учитывать стабильность состава, ожидаемую долговечность и риск вторичного загрязнения.

Разработана композиция для укрепления грунтов [15], применяемая для устройства водо- и морозозащитных слоёв дорожных одежд и земляного полотна автомобильных дорог и аэродромов, включающая негашёную известь, шлаковую муку, твёрдый нефтешлам следующего состава, % масс.: асфальто-смолистые вещества 5–13, парафины 18–40, углеводороды 4–6, механические примеси 35–60, вода 2–12 при следующем соотношении компонентов, мас. ч.: пылевато-глинистый грунт — 100, твёрдый нефтешлам указанного состава — 10–23, негашёная известь — 5–9, шлаковая мука — 3–7, вода — 12–24.

Функции компонентов композиции [15] можно интерпретировать следующим образом. Негашёная известь связывает часть воды, повышает щёлочность среды и создаёт условия для твердения минеральной системы. Шлаковая мука при наличии извести и влаги может участвовать в гидратационных и пуццолановых процессах. Вид шлака должен быть указан в проектной или технологической документации, поскольку доменные, сталеплавильные, фосфорные и другие шлаки различаются по содержанию CaO , MgO , Al_2O_3 и SiO_2 и, следовательно, по гидравлической активности. Аналогичный подход к укреплению пылевато-глинистых грунтов с применением твёрдого нефтешлама, извести и шлаковой муки рассмотрен в дорожном источнике [6]. Твёрдый нефтешлам в такой системе не следует считать единственным вяжущим компонентом: его органическая часть влияет на водочувствительность и гидрофобность, а минеральная часть выполняет функцию наполнителя.

В патенте [15] заявлены повышение прочности, водо- и морозостойкости пылевато-глинистого грунта, возможность использования пучинистого грунта в земляном полотне и основаниях, а также снижение затрат за счёт вовлечения местного вторичного сырья. Для практического применения необходимо контролировать естественную влажность грунта, степень перемешивания, равномерность распределения нефтешлама и фактическую активность шлаковой муки. Переувлажнение или избыток органической фазы могут снижать прочность и повышать риск миграции загрязняющих веществ, поэтому состав требует лабораторного подбора и экологической проверки.

Отдельное направление связано с восстановлением эксплуатационных свойств существующего покрытия. В ремонтных композициях нефтесодержащие и серосодержащие отходы не заменяют дорожный битум полностью; определяющими становятся адгезия,

водонепроницаемость, скорость формирования ремонтного слоя и совместимость с асфальтогранулятом.

Повышенное качество ремонта разрушенных участков асфальтобетонного покрытия проезжей части автомобильных дорог обеспечивает способ ремонта дорожного покрытия [16], включающий очистку площади подлежащего ремонту дефектного участка и прилегающего к нему дорожного покрытия, заполнение дефектного участка наполнителем, уплотнение наполнителя, укладку гидроизоляционного листа с захватом прилегающей к дефектному участку области дорожного покрытия, нагрев покрытия с обеспечением сцепления с наполнителем и дорожным покрытием вокруг дефектного участка.

Перед очисткой площади подлежащего ремонту дефектного участка обозначают его размеры и контуры окружающей области, после чего выполняют холодное фрезерование с приданием участку прямоугольного очертания. После очистки по всей площади наносят предварительно изготовленную серобитумную композицию, нагретую до 100–120°C. Композиция содержит, масс. %: битум — 7,36–25,96; серосодержащий отход нефтегазоочистки — 12,91–23,50; порошкообразный шламовый отход производства цеха № 15 ОАО «Химпром» — остальное до 100 % (50,55–79,73). Шламовый отход имеет фракции 0,071–0,315 мм, плотность 3,90 г/см³ и химический состав, включающий сульфаты и оксиды железа (FeSO₄ и/или Fe₂(SO₄)₃, FeO — с уточнением по паспорту отхода), Al₂O₃, P₂O₅, CaO, TiO₂, SiO₂, MnO, MgO. Подгрунтовку наносят с расходом 0,3–0,5 л/м². Дефект заполняют нагретым до 120–140°C ремонтным материалом, включающим асфальтогранулят, слабopрочный щебень карбонатных пород и серосодержащий отход нефтегазоочистки. Гидроизоляционный лист наплавляют при 50–85°C; его выполняют толщиной 2–4 мм из геосинтетической прослойки, атактического полипропилена, пластифицированного серобитумного композита, пластификатора и купершлака фракций 0,315–2,5 мм в массовых соотношениях 0,1–0,2:1:0,03–0,1:0,05–0,07 соответственно [16].

Конструктивная схема [16] сочетает серобитумную подгрунтовку, асфальтогранулят, гидроизоляционный лист, геосинтетическую прослойку и модифицированный композит. Такое сочетание предназначено для герметизации зоны ремонта и сцепления ремонтного материала с кромками существующего покрытия. Сравнение с традиционным ямочным ремонтом должно проводиться по фактической долговечности, трудоёмкости, расходу материалов и экологическим показателям, а не только по доле вовлечённых отходов.

Практика локального восстановления городских дорог горячими асфальтобетонными смесями показывает, что качество ремонтного слоя зависит от температуры укладки, режима уплотнения и подбора машинного комплекта [17]. Для серосодержащей композиции влияние на термостабильность, жёсткость и миграцию металлов следует подтверждать отдельными испытаниями; эти эффекты нельзя считать установленными только по составу материала. Поскольку технологический процесс [16] предусматривает нагрев компонентов до 100–140°C, необходимы контроль температурного режима и производственный контроль воздуха рабочей зоны. Такой способ относится к локальному ремонту подготовленных карт; при протяжённых разрушениях, потере несущей способности основания или системном колееобразовании требуется восстановление или реконструкция соответствующих слоёв.

По патенту [16] заявляемые преимущества включают сокращение сроков локального ремонта, уменьшение дополнительного расхода битумных материалов, повторное использование асфальтогранулята и вовлечение серосодержащих отходов, купершлака и местного слабopрочного щебня.

Эти преимущества следует рассматривать как характеристики заявленного технического решения до их подтверждения сравнительными эксплуатационными данными.

Композиция для укрепления грунтов [15] и способ ремонта покрытия [16] относятся к разным областям применения. Первое решение ориентировано на земляное полотно, основания и водо- или морозозащитные слои, где определяющими являются прочность, водостойкость и устойчивость загрязняющих веществ в минеральной матрице. Второе предназначено для локального ремонта верхнего асфальтобетонного покрытия, где важны адгезия, герметизация, совместимость с существующим покрытием и скорость восстановления движения.

Надёжность эффектов и экологическая оценка

Доступные исследования подтверждают работоспособность отдельных решений с нефтешламом на лабораторном уровне и в составе конкретных рецептов [7; 8; 12], но не позволяют считать нефтешлам универсальной заменой дорожному битуму. Результат зависит от состава конкретной партии, предварительной подготовки и дозировки [3]. Поэтому технологическую готовность следует оценивать для конкретного сырья, состава смеси и конструктивного слоя, а не для нефтешламов как единой категории.

Предварительная сепарация и стабилизация повышают управляемость дальнейшего использования нефтесодержащего сырья. Для асфальтовых материалов подтверждён омолаживающий эффект нефтешлама при контролируемой дозировке [8; 12]. Для нефтезагрязнённых грунтов экспериментально показано, что щёлочно-активированный гранулированный доменный шлак повышает устойчивость стабилизированного материала при циклах замораживания-оттаивания и увлажнения-высушивания [18]. Экологическая безопасность при этом должна подтверждаться испытаниями готового материала.

Утверждения о полном завершении цикла утилизации, отсутствии вторичных отходов и гарантированном повышении долговечности дорожной одежды требуют отдельного подтверждения. Переработка нефтешлама может сопровождаться газовыми выбросами, образованием водных и минеральных остатков, потреблением энергии и необходимостью обращения с загрязнёнными примесями. Экологический эффект следует оценивать по материальному балансу, результатам испытаний выщелачивания, мониторингу пилотного участка и оценке жизненного цикла (ОЖЦ) по ГОСТ Р ИСО 14040-2022 и ГОСТ Р ИСО 14044-2021. ОЖЦ в данном случае служит инструментом сравнения альтернатив: утилизации отхода, его глубокой переработки и применения в дорожной конструкции. Обзор по выщелачиванию загрязняющих веществ из асфальтовых покрытий подтверждает необходимость учитывать миграцию потенциально опасных компонентов в водную среду [5]. Инженерный обзор применения промышленных отходов в асфальтобетоне также подчёркивает необходимость предварительных испытаний свойств отходов и контроля тяжёлых металлов [19].

Экспериментальные данные [8] подтверждают возможность использования нефтешлама как омолаживающего компонента в смесях с асфальтогранулятом, но одновременно показывают зависимость результата от дозировки, совместимости с состаренным битумом и режима приготовления смеси. Поэтому нефтешлам следует рассматривать как дозируемый компонент после технологической подготовки и подбора рецептуры, а не как универсальную замену битума.

Обзор выщелачивания загрязняющих веществ из асфальтовых материалов [5] показывает, что положительные механические результаты сами по себе недостаточны для экологического обоснования.

Материал с нефтешламом должен проходить проверку миграции нефтепродуктов, полициклических ароматических углеводородов и тяжёлых металлов, особенно при использовании в слоях, контактирующих с грунтовой влагой.

Практические рекомендации

Алгоритм выбора направления использования нефтешлама в дорожном строительстве представлен на рисунке 2. Он связывает паспортизацию сырья, технологическую подготовку, разделение выходных фракций, экологическую проверку и опытную эксплуатацию.

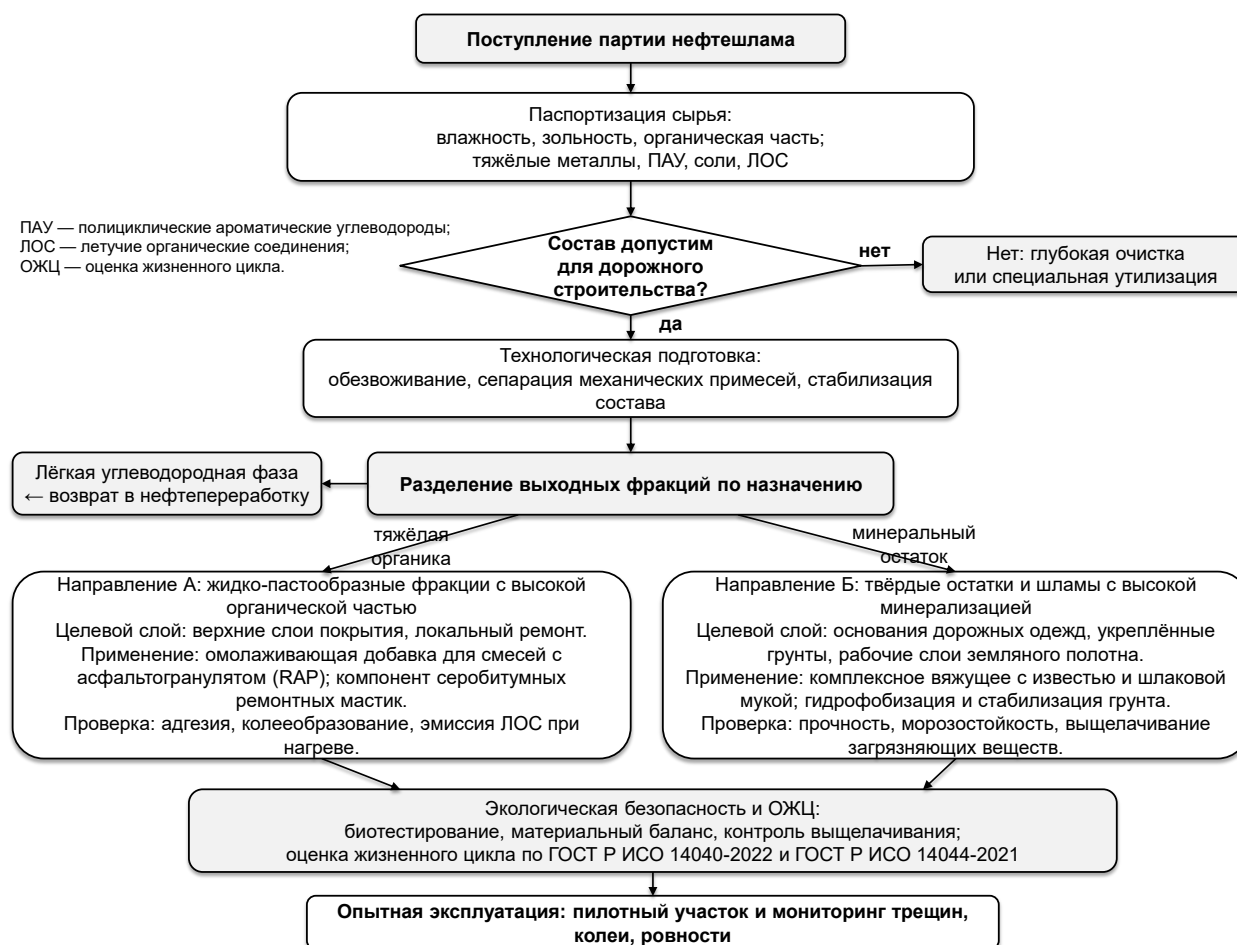


Рисунок 2. Алгоритм выбора способа утилизации нефтешлама для дорожного строительства, включающий этапы: паспортизация сырья → технологическая подготовка → проверка пригодности для целевого слоя → экологическая оценка → опытная эксплуатация (разработан авторами)

Сводный алгоритм принятия решения о пригодности нефтешлама для конкретных видов дорожных работ формализован в виде контрольной матрицы (табл. 1). Для минимизации рисков, связанных с вариативностью состава отхода, матрица разделена на блоки паспортизации сырья, технологической подготовки, проверки целевого слоя, дорожно-механических свойств, экологической безопасности и опытной эксплуатации.

Для дорог, аэродромов и иных транспортных сооружений нефтешламы следует рассматривать не как массовый заменитель традиционных материалов, а как условно пригодный вторичный компонент. Его применение оправдано при сочетании трёх условий: наличие локального источника отхода, технологическая возможность подготовки сырья и подтверждённая работоспособность смеси в составе конкретного конструктивного слоя.

На уровне проектной документации необходимо фиксировать происхождение нефтешлама, способ подготовки, допустимые диапазоны состава, рекомендуемую дозировку, ограничения по типам слоёв и условиям увлажнения. Для верхних слоёв асфальтобетонного покрытия требования должны быть наиболее жёсткими из-за прямого воздействия температуры, воды,

транспорта и атмосферных факторов. Для нижних слоёв основания и укрепленных грунтов может быть допустим более широкий диапазон минеральной составляющей, но экологический контроль выщелачивания становится особенно значимым из-за контакта с грунтовой влагой.

Таблица 1

Минимальный набор проверок перед внедрением материалов с нефтешламами

Блок проверки	Показатели	Назначение
Паспортизация сырья	Влажность, %; минеральные примеси и зольность, %; фракционный состав, мм; содержание органических фракций, серы и солей, %; тяжёлых металлов, мг/кг; ПАУ, мг/кг; ЛОС при нагреве, мг/м³; терминологическая привязка к обращению с отходами — ГОСТ 30772-2001	Определение пригодности партии нефтешлама и выбора способа подготовки
Технологическая подготовка	Степень обезвоживания, %; остаточная влажность, %; доля механических примесей, %; температура подготовки, °C; однородность и коэффициент вариации состава, %	Снижение варибельности и риска нестабильного поведения материала
Целевой слой и область применения	Верхний слой покрытия, основание, дополнительный слой основания, рабочий слой земляного полотна; толщина слоя, см; условия увлажнения; для асфальтобетона — ГОСТ Р 58406.2-2020, ГОСТ Р 58406.3-2020, ГОСТ Р 58406.6-2020, для укрепленных грунтов — ГОСТ Р 70452-2022, ГОСТ Р 70453-2022	Исключение некорректного применения материала в слое, требования которого по прочности, морозостойкости, водостойкости или экологической безопасности не соответствуют фактическим свойствам смеси
Дорожно-механические свойства	Предел прочности, МПа; водостойкость, доли ед.; морозостойкость, циклы; трещиностойкость; глубина колеи, мм; сцепление; модуль деформации, МПа; температура испытаний, °C	Подтверждение соответствия функции слоя дорожной одежды
Экологическая безопасность	Выщелачивание нефтепродуктов, тяжёлых металлов и ПАУ, мг/л; эмиссия ЛОС при нагреве, мг/м³; токсичность водной вытяжки; общие требования к обращению с отходами и биотестированию — ГОСТ 30772-2001, ГОСТ Р 57163-2016	Исключение вторичного загрязнения почвы, воды и воздуха
Опытная эксплуатация	Пилотный участок; срок наблюдений, мес./сезоны; колея, мм; ровность; трещины, м/м²; водонасыщение, %; дефекты кромок и швов	Переход от лабораторной пригодности к доказанной эксплуатационной эффективности

Составлена авторами

Приоритетными для дальнейшей проверки являются два направления: использование подготовленной органической фазы как ограниченного омолаживающего компонента в смесях с асфальтогранулятом и применение твёрдых нефтесодержащих остатков в стабилизированных грунтовых или органоминеральных слоях. Для обоих направлений необходима последовательность «сырьё — подготовка — лабораторный подбор — экологическая проверка — опытный участок — мониторинг». Для асфальтовых материалов со вторичными компонентами необходимость предварительных инженерных и экологических испытаний подтверждается обзорами [5; 19]. Для пилотного внедрения рационально рассматривать технологические проезды, укрепление обочин и нижние конструктивные слои при обязательном подтверждении механических и экологических показателей.

Особую актуальность применение подготовленных нефтешламов приобретает в Арктической зоне и районах Крайнего Севера, где добыча углеводородов сопряжена с необходимостью развития транспортной инфраструктуры, а экстремальные климатические условия и сложная логистика повышают стоимость дорожного строительства. Исследования по проектированию и строительству дорожных одежд в арктическом климате подтверждают значимость региональных климатических и логистических ограничений [20].

В этих условиях использование локально подготовленного нефтесодержащего сырья может быть экономически оправдано для технологических проездов, нижних конструктивных слоёв и укрепления обочин, если выполнены требования к прочности, морозостойкости и экологической безопасности.

Ограничения применения

Ограничения применения определяются фактическим составом нефтешлама и условиями его образования [3]. Повышенное содержание парафинов требует контроля температурного режима подготовки; смолисто-асфальтеновая часть влияет на вязкость и совместимость с битумными материалами; повышенное содержание серы, минеральных примесей и металлов усиливает требования к контролю эмиссий и выщелачивания [5]. Для каждого нового источника необходимы повторная паспортизация, корректировка рецептуры и проверка механических, санитарно-химических и эксплуатационных показателей. Результаты, полученные для одной партии, нельзя автоматически переносить на другие месторождения, нефтеперерабатывающие заводы или шламонакопители.

Перспективы автоматизации контроля

Матрица критериев (табл. 1) требует однозначно идентифицируемых, повторяемых и сопоставимых исходных данных. В дорожном хозяйстве геоинформационный подход используется для пространственной привязки измеряемых параметров [21], а управление инженерными данными жизненного цикла дороги связывает изыскания, проектирование, строительство, диагностику, паспортизацию, инвентаризацию и управление состоянием в едином информационном контуре [22]. Для контроля нефтешламов эти принципы означают, что паспорта отходов, протоколы испытаний и результаты опытной эксплуатации должны формироваться как структурированные данные, пригодные для последующей проверки и сопоставления.

Структура таблицы 1 допускает программную проверку паспортов отходов и протоколов лабораторных испытаний. Возможность извлечения и валидации параметров с помощью предметно-ориентированной большой языковой модели, показанная для задач транспортного моделирования [23], может быть перенесена на документы по нефтешламам только после предметной адаптации набора признаков и правил проверки. Такая автоматизация способна ускорить предварительный контроль полноты и согласованности данных, но не заменяет лабораторные испытания и опытную эксплуатацию.

Заключение

Нефтешламы могут использоваться в дорожном строительстве только как ограниченно применимое вторичное сырьё с подтверждёнными характеристиками конкретной партии. Технологическая схема должна включать паспортизацию, подготовку сырья, подбор дозировки, нормируемые механические испытания и контроль выщелачивания. Для решений, связанных с нагревом и разделением фаз, дополнительно необходимы материальный баланс и контроль побочных потоков. Оценка жизненного цикла позволяет сопоставлять применение нефтешлама с альтернативными способами обращения с отходом, а мониторинг опытного участка переводит лабораторную пригодность в подтверждённую эксплуатационную оценку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лофлер М. Направления использования нефтешламов в дорожном строительстве / М. Лофлер, В. Г. Шелегов, Н. А. Слободчикова // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2018. — Т. 8, № 4(27). — С. 98–104. — DOI: [10.21285/2227-2917-2018-4-98-104](https://doi.org/10.21285/2227-2917-2018-4-98-104). — EDN: [YWAKYX](https://www.edn.ru/YWAKYX). (дата обращения: 03.03.2026).

2. Коршунова Т. Ю. Нефтешламы: состояние проблемы в Российской Федерации и методы снижения их отрицательного воздействия на окружающую среду / Т. Ю. Коршунова, О. Н. Логинов // ЭкоБиоТех. — 2019. — Т. 2, № 1. — С. 75–85. — DOI: [10.31163/2618-964X-2019-2-1-75-85](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2019-2-1-75-85). — EDN: [VXETPC](https://t-s.today/EDN/VXETPC). (дата обращения: 05.03.2026).
3. Pauzi N.N.M. Review on the Treatment of Petroleum Sludge and Use as Construction Materials / N.N.M. Pauzi, M.S.A. Ahmad Shah // Civil and Sustainable Urban Engineering. — 2022. — Т. 2, № 1. — С. 12–20. — DOI: [10.53623/csue.v2i1.74](https://doi.org/10.53623/csue.v2i1.74). — EDN: [WTATZZ](https://t-s.today/EDN/WTATZZ). (дата обращения: 06.03.2026).
4. Cui C. Utilization of oil-based drilling cuttings as asphalt pavement surface: Study on the mechanical characteristics and long-term environmental impact / C. Cui, D. Yan, M. Liu [et al.] // Environmental Technology & Innovation. — 2023. — Т. 30. — Art. 103052. — DOI: [10.1016/j.eti.2023.103052](https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103052). — EDN: [NADQLJ](https://t-s.today/EDN/NADQLJ). (дата обращения: 10.03.2026).
5. Jayaneththi Y.H. A critical review on leaching of contaminants from asphalt pavements / Y.H. Jayaneththi, D. Robert, F. Giustozzi // Science of the Total Environment. — 2024. — Т. 950. — Art. 174967. — DOI: [10.1016/j.scitotenv.2024.174967](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174967). — EDN: [SJCBRI](https://t-s.today/EDN/SJCBRI). (дата обращения: 11.03.2026).
6. Буренин В. В. Технологические способы строительства качественных автомобильных дорог / В. В. Буренин, А. А. Котов // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2025. — № 4. — С. 2–7. — EDN: [NTYABJ](https://t-s.today/EDN/NTYABJ). (дата обращения: 12.03.2026).
7. Al Zubaidy I.A.H. Production of sustainable pavement with oil sludge / I.A.H. Al Zubaidy, A.K. Al-Tamimi // Road Materials and Pavement Design. — 2014. — Т. 15, № 3. — С. 691–700. — DOI: [10.1080/14680629.2014.908139](https://doi.org/10.1080/14680629.2014.908139). (дата обращения: 13.03.2026).
8. Dalhat M.A. Utilization of oil sludge as rejuvenator in hot-mix asphalt containing reclaimed asphalt concrete / M.A. Dalhat, S.A. Osman, N.D. Mu'azu, O. Alagha // Construction and Building Materials. — 2022. — Т. 338. — Art. 127483. — DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.127483](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127483). — EDN: [PZLJMY](https://t-s.today/EDN/PZLJMY). (дата обращения: 14.03.2026).
9. Ярышкин И. А. Влияние регенерированной асфальтобетонной смеси на колеиность автомобильных дорог / И. А. Ярышкин // Транспортные сооружения. — 2022. — Т. 9, № 4. — URL: <https://t-s.today/PDF/09SATS422.pdf>. — DOI: [10.15862/09SATS422](https://doi.org/10.15862/09SATS422). — EDN: [GDKZGP](https://t-s.today/EDN/GDKZGP). (дата обращения: 16.03.2026).
10. Ярмолинский В. А. Выбор оптимального количества вяжущего при холодном ресайклинге асфальтобетонных покрытий / В. А. Ярмолинский, М. О. Жабкин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). — 2021. — № 2(65). — URL: <https://www.madi.ru/5715-vestnik-moskovskogo-avtomobilno-dorozhnogo-gosudarstvennogo.html>. — EDN: [TVXDxD](https://t-s.today/EDN/TVXDxD). (дата обращения: 17.03.2026).
11. Лупанов А. П. Пути улучшения свойств асфальтогранулобетонов / А. П. Лупанов, А. С. Суханов, В. В. Силкин [и др.] // Транспортное строительство. — 2021. — № 3. — С. 6–8. — URL: https://tc-journal.ru/docs/tc_03-2021.pdf. — EDN: [EXNIHH](https://t-s.today/EDN/EXNIHH). (дата обращения: 18.03.2026).
12. Memon A.M. Valorization of petroleum sludge as rejuvenator for recycled asphalt binder and mixture / A.M. Memon, M.H. Sutanto, Z.A. Memon [et al.] // Case Studies in Construction Materials. — 2024. — Т. 20. — Art. e03318. — DOI: [10.1016/j.cscm.2024.e03318](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03318). — EDN: [LHZYKK](https://t-s.today/EDN/LHZYKK). (дата обращения: 19.03.2026).

13. Пат. 2041861 Российская Федерация, МПК C10G 53/14. Способ переработки нефтяных шламов и ловушечных нефтей / Ю. А. Беляев, В. А. Хорошилов, И. И. Шопов. — Оpubл. 20.08.1995. — Бюл. № 23. (дата обращения: 20.03.2026).
14. Катасонов М. В. Применение влажной органоминеральной смеси для устройства конструктивных слоёв дорожной одежды при строительстве автодорожного подхода к Керченскому мосту со стороны Тамани / М. В. Катасонов, А. И. Лескин, А. В. Кочетков [и др.] // Транспортные сооружения. — 2018. — Т. 5, № 3. — URL: <https://t-s.today/PDF/03SATS318.pdf>. — DOI: [10.15862/03SATS318](https://doi.org/10.15862/03SATS318). — EDN: [YAFIOT](https://edn.yafiot.ru). (дата обращения: 21.03.2026).
15. Пат. 2493316 Российская Федерация, МПК E01C 7/36. Композиция для укрепления грунтов / И. Н. Хабибуллина, М. Е. Бещенов. — Оpubл. 20.09.2013. — Бюл. № 26. (дата обращения: 23.03.2026).
16. Пат. 2820194 Российская Федерация, МПК E01C 7/32. Способ ремонта дорожного покрытия / Д. И. Гофман, А. И. Лескин, С. В. Алексиков [и др.]. — Оpubл. 30.05.2024. — Бюл. № 16. (дата обращения: 24.03.2026).
17. Алексиков С. В. Особенности ремонта проезжей части городских дорог горячими асфальтобетонными смесями / С. В. Алексиков, И. А. Данилов, А. О. Евдокименко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2022. — № 1(86). — С. 71–80. — URL: <https://vgasu.ru/nauka/zhurnaly/vestnik-volggasu/arkhiv-vypuskov/2022-1/6/>. — EDN: [KHfVDT](https://edn.khfvdt.ru). (дата обращения: 25.03.2026).
18. Arabani M. The effect of various environmental conditions on stabilization/solidification (S/S) of oil-contaminated soil using alkaline activation of granulated blast furnace slag (GBFS) / M. Arabani, H. Haghsheno // Construction and Building Materials. — 2023. — Т. 409. — Art. 134022. — DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.134022](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134022). — EDN: [ICRHVS](https://edn.icrhvs.com). (дата обращения: 26.03.2026).
19. Hasan M.R.M. Review of sustainability, pretreatment, and engineering considerations of asphalt modifiers from the industrial solid wastes / M.R.M. Hasan, J.-W. Chew, A. Jamshidi [et al.] // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). — 2019. — Т. 6, № 3. — С. 209–244. — DOI: [10.1016/j.jtte.2018.08.001](https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.08.001). (дата обращения: 27.03.2026).
20. Pospelov P. Pavement design and construction in the Arctic climate / P. Pospelov, A. Korochkin, S. Evtyukov // Transportation Research Procedia. — 2021. — Т. 57. — С. 489–494. — DOI: [10.1016/j.trpro.2021.09.076](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.076). — EDN: [RRVPXV](https://edn.rvpxv.com). (дата обращения: 28.03.2026).
21. Пospelов П. И. Геоинформационные технологии в управлении дорожным хозяйством / П. И. Пospelов, А. А. Котов // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2005. — № 4(35). — С. 7–9. — EDN: [PYCYXL](https://edn.pycycl.com). (дата обращения: 30.03.2026).
22. Пospelов П. И. Управление инженерными данными компонентов модели жизненного цикла автомобильной дороги / П. И. Пospelов, А. А. Котов, Г. А. Федотов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). — 2012. — № 4(31). — С. 93а–97. — EDN: [PGRYPH](https://edn.pgrypn.com). (дата обращения: 30.03.2026).
23. Остроух А. В. Разработка и обучение предметно-ориентированной большой языковой модели для автоматизации извлечения и валидации параметров в задачах транспортного моделирования / А. В. Остроух, А. А. Подберёзкин, Ц. Б. Пронин [и др.] // Современные наукоемкие технологии. — 2026. — № 4. — С. 317–323. — DOI: [10.17513/snt.40767](https://doi.org/10.17513/snt.40767). — EDN: [NDKGBO](https://edn.ndkgbo.com). (дата обращения: 31.03.2026).

Burenin Vladislav Valentinovich

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia
E-mail: madi.1965@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=549252

Katarzhin Aleksandr Vladimirovich

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia
E-mail: ralfets@yandex.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=703365

Kotov Andrey Aleksandrovich

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia
E-mail: gt@madi.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6855-0688>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=689703

Processing and application of oil sludge in road construction: technological solutions and a multi-criteria assessment approach

Abstract. Processing oil sludge for road construction is considered a task of controlled incorporation of heterogeneous oily raw materials into road-building materials, contingent upon mandatory verification of composition, technological readiness, and environmental safety. Oil sludge cannot serve as a universal substitute for road bitumen due to variable contents of water, mineral impurities, asphaltene-resinous substances, sulfur, polycyclic aromatic hydrocarbons, and heavy metals. An engineering decision-making sequence is proposed, comprising batch certification, preliminary separation and stabilization, assignment of output fractions by intended use, laboratory testing of mechanical road properties, leaching control, and trial operation. The organic fraction is evaluated as a restricted rejuvenating or plasticizing agent for mixtures with reclaimed asphalt pavement, while solid oily residues are viewed as a constituent for stabilized soils and organomineral layers. It is demonstrated that the scope of application is determined not by the waste origin, but by the combined characteristics of a specific batch and the structural requirements of the pavement layer. Surface wearing courses require stringent compatibility, moisture resistance, rutting resistance, and low thermal emissions; for base courses and the subgrade working layer, strength, frost resistance, and leaching behavior are critical. An application-selection algorithm and a control matrix have been developed, facilitating a shift from declarative recycling to verified engineering suitability of the oil sludge. The control matrix is also suitable for subsequent digital verification of raw material specifications and test reports. Furthermore, the prospects of localized raw material preparation for the Arctic Zone and Far North regions are substantiated, where logistical constraints enhance the importance of secondary local materials.

Keywords: oil sludge; road construction; reclaimed asphalt pavement (RAP); stabilized soils; organomineral mixtures; Arctic Zone; environmental safety; leaching; life cycle assessment; artificial intelligence