
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ/DESIGN AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRFIELDS, BRIDGES AND TRANSPORT TUNNELS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.22>**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ СЕРЫ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Научная статья

Каменчуков А.В.^{1,*}, Павлов Н.А.²¹ORCID : 0000-0001-7997-3195;^{1,2}Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (006641[at]togudv.ru)

Аннотация

Статья посвящена исследованию эффективности применения сероасфальтобетона в дорожном строительстве, акцентируя внимание на преимуществах использования технической серы в качестве модификатора асфальтобетонных покрытий. В ходе проведенного исследования было доказано, что включение серы в состав асфальтобетонных смесей позволяет значительно повысить устойчивость покрытия к образованию колеи, улучшить его прочность и эластичность, а также снизить затраты на производство материала за счёт экономии битума. По показателям прочности сероасфальтобетон более устойчив к изменениям температуры. В заключение даны рекомендации по применению сероасфальтобетона в сфере дорожного строительства и смежных отраслях производства.

Ключевые слова: автомобильная дорога, покрытие, битум, модификаторы, сера, прочность, долговечность, экологичность.

THE APPLICATION OF TECHNICAL SULPHUR FOR THE MODIFICATION OF ROAD SURFACES

Research article

Kamenchukov A.V.^{1,*}, Pavlov N.A.²¹ORCID : 0000-0001-7997-3195;^{1,2}Pacific State University, Khabarovsk, Russian Federation

* Corresponding author (006641[at]togudv.ru)

Abstract

The article studies the effectiveness of using sulphur-modified asphalt concrete in road construction, focusing on the advantages of using industrial sulphur as a modifier for asphalt concrete pavements. The research proved that incorporating sulphur into asphalt concrete mixtures significantly improves the pavement's resistance to rutting, enhances its strength and elasticity, and reduces production costs through bitumen savings. In terms of strength, sulphur-modified asphalt concrete is more resistant to temperature fluctuations. In conclusion, recommendations are provided on the use of sulphur-modified asphalt concrete in road construction and related industries.

Keywords: motorway, road surface, bitumen, modifiers, sulphur, strength, durability, environmental friendliness.

Введение

Современное дорожное строительство сталкивается с рядом трудностей, вызванных как внешней политической обстановкой и уходом с рынка иностранных компаний, так и дефицитом квалифицированных кадров [1], [2]. На этом фоне особенно остро стоят проблемы низкого эксплуатационного качества традиционных асфальтобетонных покрытий (на немодифицированном битуме), необходимости сокращения расходов на строительство и содержание дорог, а также обеспечения устойчивого развития всех отраслей экономики. Традиционные асфальтобетонные покрытия характеризуются низкой устойчивостью и слабым сопротивлением к деформациям, особенно температурным, и воздействию влаги на структуру материала [3], [4], [5]. Эти характеристики становятся критичными в условиях постоянного увеличения интенсивности движения, роста осевой нагрузки от транспортных средств, так за последние 5 лет значительно изменились требования к конструкциям по показателю прочности, который, например для III категории дороги вырос более чем в 1,5 раза (с 200 до 320 МПа).

Согласно Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года, проведение научных исследований и разработка новых технологий направлены на создание и внедрение долговечных, экономичных и энергосберегающих строительных материалов. Цель этих мер заключается в увеличении межремонтных сроков и повышении производительности дорожно-строительных работ, что соответствует актуальным требованиям современной дорожной отрасли.

Для решения задач импортозамещения и повышения качества дорожных покрытий, используемых в суровых климатических условиях, проводится исследование эффективности модификации асфальтобетонных покрытий технической серой, которая является побочным продуктом нефтепереработки.

Использование технической серы в дорожном строительстве нельзя назвать принципиально новым решением, однако конкретные научные исследования и опыт её применения в России ограничены. Основная масса экспериментальной работы выполнена в западных странах, таких как США и Канада, где применение сероасфальтобетона распространено широко [6], [7], [8]. Однако климатические и инфраструктурные условия

эксплуатации дорог в этих регионах существенно отличаются от российских реалий, особенно применительно к территориям центрального и северного регионов Дальнего Востока. Поэтому перед отраслью дорожного строительства встает большой вызов по повышению прочности и долговечности дорожных покрытий, адаптации и разработки материалов обеспечивающих требуемые эксплуатационные показатели с учетом возросших нагрузок.

Таким образом, основной целью исследования является оценка эксплуатационной надежности и экономической целесообразности устройства дорожных покрытий из асфальтобетонов, модифицированных отечественными добавками на основе серы.

Основные сведения

Вопросы хранения и использования технической серы остро стоят в экологической повестке страны. Несмотря на значительное снижение выпуска технической серы в России по состоянию на сентябрь 2025 года (примерно на 13,9% по сравнению с аналогичным периодом предыдущего года), отечественная промышленность продолжает производить примерно в полтора раза больше серы, чем способны потребить остальные сектора экономики. По данным Минпромторга РФ, за январь–октябрь 2025 года объем произведенной серы составил около 3,5 млн тонн.

Главными источниками (поставщиками и производителями) технического сероводорода в России выступают нефтегазовые гиганты — Газпром, Лукойл и Роснефть, производящие серу путём выделения её из сероводорода, образующегося при переработке нефти и газа. Дополнительно сера производится в результате переработки пиритов и серосодержащих руд металлов.

Учитывая многообразие источников получения, техническую серу можно разделить на следующие виды:

- каменная сера — добывается естественным путем при открытой разработке месторождений;
- недегазированная сера — обладает наивысшей чистотой и используется главным образом в химической промышленности и фармакологии;
- гранулированная сера — производится промышленным способом и представлена мелкими частицами округлой формы диаметром от 1 до 10 мм (в зависимости от сортировки);
- серные шлаки и концентраты — являются побочными продуктами металлургии и других промышленных процессов, из которых возможно извлечь техническую серу после дополнительной обработки.

Следует отметить, что далеко не вся техническая сера пригодна для использования в качестве модификаторов дорожно-строительных материалов. Для этой цели подходят лишь виды серы с минимально возможным содержанием примесей, негативно влияющих на свойства связующих компонентов, таких как битумы и битумные эмульсии. Хотя наиболее чистой формой является недегазированная сера, её широкое применение ограничено высокими затратами и необходимостью сохранения для нужд медицины и иных чувствительных областей промышленности.

Для целей дорожного строительства подходит к применению гранулированная сера [9], [10]. Применение данного материала обусловлено следующими факторами:

- материал является достаточно чистым, что обеспечивает хорошую адгезию (зависит от химического состава серы);
- практически полностью растворяется в битуме, обеспечивая устойчивые связи;
- фракционированный материал удобен в транспортировке и при длительном хранении не теряет своих свойств.

В исследовании для модификации битума используется немодифицированная гранулированная сера Хабаровского НПЗ. Характеристики технической гранулированной серы соответствуют ТУ 2112-140-31323949-2008 и представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнение выпускаемой серы на НПЗ Хабаровского края с ТУ 2112-140-31323949-2008

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.22.1>

| Наименование показателя | Метод испытания | Норма по ТУ 2112-140-31323949-2008. | Фактическое значение |
|---|---------------------------|--|--|
| Внешний вид для марки В | Визуально | Гранулы от светло-зеленого до зеленого цвета | Гранулы от светло-зеленого до зеленого цвета |
| Форма гранул | Визуально | Полусферическая | Полусферическая |
| Массовая доля гранул диаметром 2.0-70 мм, % | ТУ 2112-140-31323949-2008 | Не менее 90,0 | 99,3 |
| Насыпная плотность г/см ³ | ГОСТ 127.2-93 | 1,1–1,3 | 1,1 |
| Массовая доля серы, % | ГОСТ 127.2-93 | Не менее 99,95 | 99,983 |
| Массовая доля золы, % | ГОСТ 127.2-93 | Не более 0,03 | 0,010 |
| Массовая доля органических веществ, % | ГОСТ 127.2-93 | Не более 0,03 | 0,002 |
| Массовая доля кислот в пересчете на серную кислоту, % | ГОСТ 127.2-93 | Не более 0,003 | 0,001 |

| Наименование показателя | Метод испытания | Норма по ТУ 2112-140-31323949-2008. | Фактическое значение |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| Массовая доля воды, % | ТУ 2112-140-31323949-2008 | Не более 0,2 | 0,004 |
| Механические загрязнения | Визуально | Не допускается | Отсутствие |

Следует отметить, что существующие требования сероасфальтобетонам СТО 5718-003-37854292-2012 «Смеси сероасфальтобетонные и сероасфальтобетоны. Технические условия» не подразумевают испытания материалов на стойкость к колееобразованию, а именно этот показатель, в настоящее время, является оценкой эксплуатационной надежности покрытия. Кроме этого, сероасфальтобетоны не оценивают по критерию прочности на растяжение при изгибе, что так же не позволяет сравнивать данный материал с современными асфальтобетонами.

Методы и испытания

Исследование свойств дорожных порывтй выполнялось по критериям растяжения при изгибе и стойкости к колееобразованию. Для обоих испытаний необходимо изготовить образцы-плиты в соответствии с ГОСТ Р 58406.4-2020. Основным оборудованием для испытания образцов является роллерный компактор, модель В039, предназначенный для изготовления образцов-плит из асфальтобетона, а также две машины для испытаний: испытание на растяжение при изгибе на машине ПМ-1А-70АБ и установка возвратно-поступательного нагружения SmarTracker В038А для определения стойкости к колееобразованию.

Для испытаний изготовлено 4 партии плит, по 4 плиты в каждой партии. Перове две партии (партия № 1 и № 2) изготовлены из асфальтобетона для покрытий А16Вн на битуме БНД 100/130 по ГОСТ Р 58406.2-2020. Вторые две партии изготовлены из асфальтобетона для покрытий А16Вн на модифицированном битуме со следующим составом: битум БНД 100/130 в количестве 90 % по массе немодифицированного битума, гранулированная сера в количестве 10 % по массе битума.

Серии плит № 1 и № 3 (модифицированная серой) испытывают на растяжение при изгибе, при этом каждая плита в серии распиливается на 3 образца балочки размером 30,5x7,0x7,0 см. Таким образом, на растяжение при изгибе испытывают две партии образцов балочек № 1 и № 3 (модифицированная серой) по 12 балочек в серии. В соответствии с п. 8.4.1 ГОСТ Р 58406.6-2020 образцы перед испытанием выдерживают 24 ч в морозильной камере при температуре минус 18±2 °С.

Предел прочности при растяжении при изгибе $R_{изг}$ (МПа), а также относительную деформацию растяжения $E_{пр}$ (%) определяют по формулам:

$$R_{изг} = 3PL / (2bh^2)10(-2); \quad (1)$$

$$E = (6hl_{пр}) / L^2, \quad (2)$$

где P — разрушающая нагрузка, Н;
 L — расстояние между опорами, см;
 b — ширина образца, см;
 h — высота образца, см;
 $l_{пр}$ — максимальное значение прогиба испытуемого образца в момент разрушения, см.

В соответствии с разделом 9 ГОСТ Р 58406.3-2020 испытание продолжают в течение 10 000 циклов нагрузки (20 000 проходов колеса) или до образования глубины колеи на испытуемых образцах более 15 мм. Температура испытаний составляет 60+1 °С, что не ниже максимальной расчетной температуры слоя, рассчитанной в соответствии с ГОСТ Р 58400.3-2019.

При определении стойкости покрытия к колееобразованию оцениваются такие параметры покрытия, как пропорциональная глубина колеи PRD (%) и угол наклона кривой колееобразования WTS (мм/1000 циклов), которые определяются по формулам:

$$PRD = RD / h100; \quad (3)$$

$$WTS = (d_1000 - d_5000) / 5, \quad (4)$$

где RD — глубина колеи при определенном количестве прокатываний, мм;
 h — высота образца, мм;
 d_{1000} — глубина колеи после 10 000 циклов нагружения, мм;
 d_{5000} — глубина колеи после 5 000 циклов нагружения, мм.

Результаты

Испытания образцов выполнены в сертифицированной дорожной лаборатории. Результаты определения предела прочности на растяжение при изгибе представлены в таблице 2, а стойкости к колееобразованию в таблице 3 и на рисунке 1.

Таблица 2 - Предел прочности на растяжение при изгибе

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.22.2>

| Наименование | Прочностные показатели | | | |
|----------------|---|--|---|--|
| | немодифицированный асфальтобетон | | асфальтобетон на битуме, модифицированном серой | |
| | прочность на растяжение при изгибе, МПа | предельная относительная деформация, % | прочность на растяжение при изгибе, МПа | предельная относительная деформация, % |
| Партия 1 | 8,97 | 0,10 | 10,09 | 0,09 |
| Партия 2 | 8,69 | 0,09 | 10,16 | 0,10 |
| Партия 3 | 9,19 | 0,10 | 10,47 | 0,09 |
| Партия 4 | 8,93 | 0,10 | 10,39 | 0,07 |
| Среднее | 8,95 | 0,10 | 10,28 | 0,09 |

Из таблицы 2 видно, что прочность образцов асфальтобетона, модифицированного серой на 10–15% выше, чем у образцов из немодифицированного асфальтобетона и показывает высокую однородность.

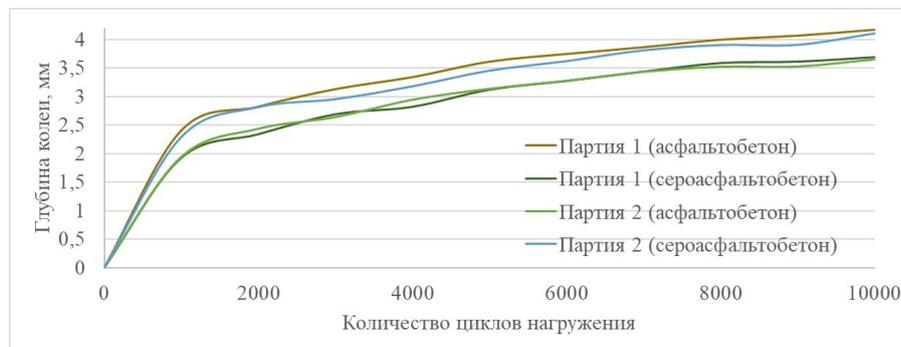


Рисунок 1 - График колееобразования
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.22.3>

Таблица 3 - Определение стойкости к колееобразованию

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.22.4>

| Наименование | Прочностные показатели | | | | | |
|----------------|----------------------------------|--------------|--------------|---|--------------|--------------|
| | немодифицированный асфальтобетон | | | асфальтобетон на битуме, модифицированном серой | | |
| | PRD5000 | PRD10000 | WTS | PRD5000 | PRD10000 | WTS |
| Партия 1 | 3,614 | 4,175 | 0,112 | 3,125 | 3,696 | 0,111 |
| Партия 2 | 3,457 | 4,111 | 0,131 | 3,132 | 3,646 | 0,103 |
| Среднее | 3,536 | 4,143 | 0,121 | 3,129 | 3,671 | 0,108 |

Результаты лабораторных испытаний позволяют говорить о том, что сероасфальтобетон обладает более высокой прочностью и стойкостью к колееобразованию по сравнению с традиционными асфальтобетонами, а следовательно, является более долговечным.

Также для оценки эффективности применения серы для модификации битумов и приготовления сероасфальтобетона выполнено экономическое сравнение затрат на приготовление асфальтобетона для покрытий А16Вн на битуме БНД 100/130 и сероасфальтобетона. Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Сравнение стоимости смесей

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.22.5>

| Наименование | Цена за 1 т. материала, р. | Немодифицированный асфальтобетон | | Асфальтобетон на битуме, модифицированном серой | |
|----------------------|----------------------------|----------------------------------|--------------|---|--------------|
| | | расход на 1 т. смеси, кг | стоимость, р | расход на 1 т. смеси, кг | стоимость, р |
| Крупный заполнитель | 2175 | 540,2 | 1174,94 | 540,4 | 1175,37 |
| Мелкий заполнитель | 928 | 323,1 | 299,84 | 323,1 | 299,84 |
| Битум 100/130 | 26180 | 44,3 | 1159,77 | 31,4 | 822,05 |
| Минеральный порошок | 5100 | 92,4 | 471,24 | 91,6 | 467,16 |
| Гранулированная сера | 3500 | 0 | 0 | 13,5 | 47,25 |
| Итого | – | 1000 | 3105,79 | 1000 | 2811,67 |

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

1. Сероасфальтобетон обладает более высокой стойкостью к колееобразованию и прочностью на растяжение при изгибе (на 25–35% лучше, чем немодифицированный асфальтобетон А16Вн на битуме БНД 100/130 по ГОСТ Р 58406.2-2020), а следовательно является более долговечным материалом.

2. Снижение затрат на производство сероасфальтобетона, за счет экономии битума, позволяет компенсировать затраты на модернизацию асфальтобетонного завода, что в дальнейшем может привести к существенной экономии материальных ресурсов и экономической окупаемости (при обеспечении достаточных объемов производства сероасфальтобетона).

Результаты, полученные авторами сопоставимы с результатами других исследователей изучающих влияние технической серы на прочность асфальтобетонов в центральных регионах страны [8], [11], [12].

Заключение

В результате выполненных исследований установлено, что сероасфальтобетон является перспективным и конкурентно способным материалом для устройства дорожных покрытий, эксплуатируемых в условиях возрастающих нагрузок и интенсивности движения транспортных средств. Применение серомодифицированного битумом позволяет повысить прочность на растяжение при изгибе и увеличить стойкость к колееобразованию примерно на 25–35%, по сравнению с традиционными асфальтобетонами, т.е. материал является более долговечным. Кроме этого, применение серы в качестве модификатора битума позволит снизить экологическую нагрузку на окружающую среду и приводит к экономии битумного вяжущего. Таким образом, можно говорить о том, что применение серы для модификации дорожных асфальтобетонов является целесообразным с экономической и технической точек зрения.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Чернявский В.С. Механизмы минимизации последствий мирового финансового кризиса для экономики России / В.С. Чернявский, С.С. Шегуров, А.Н. Соломошук // Вестник МИРБИС. — 2022. — № 1(29). — С. 67–77.
2. Борисов Б.В. Институциональный ответ на глобальные отраслевые вызовы, стоящие перед предприятиями нефтегазоперерабатывающего сегмента / Б.В. Борисов, П.П. Лукьяненко, Е.Е. Ревин [и др.] // Экономика и управление инновациями. — 2025. — № 2(33). — С. 52–61.
3. Zhevanov V. Increasing the fatigue life of asphalt concrete by complex modification of their structure / V. Zhevanov, V. Bratchun, V. Postoenko // Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. — 2023. — № 4(162). — Р. 70–75.
4. Веренько В.А. Исследование усталостной долговечности асфальтобетонов, модифицированных полимерными добавками различных типов / В.А. Веренько, А.В. Ладышев, Р.К. Гатальский // Наука и техника. — 2018. — Т. 17, № 6. — С. 451–457.



5. Кадыров Г.Ф. Сопоставительные испытания асфальтобетона на усталостную долговечность с применением различных современных лабораторных методов / Г.Ф. Кадыров, Е.Н. Симчук, А.Н. Тиратуриян // Научный журнал строительства и архитектуры. — 2023. — № 4(72). — С. 121–132.
6. Nurmukhanov A. Physico-chemical and mechanical properties of sulfur asphalt concrete / A. Nurmukhanov, L. Tastanova // Internauka. — 2024. — № 2-3(319). — P. 51–52.
7. Sagyndykov A. Modified sulfur concretes with phosphoric slag filler / A. Sagyndykov, Zh.T. Suleimenov, G.M. Bayalieva [et al.] // Mekhanika i tekhnologii. — 2025. — № 1(87). — P. 171–179.
8. Ле Хыу Т. Физико-механические свойства серобитумных вяжущих и сероасфальтобетонов / Т. Ле Хыу // Инженерный вестник Дона. — 2022. — № 6(90). — С. 646–664.
9. Левин Е.В. Утилизация обезвоженного нефтешлама в дорожном строительстве / Е.В. Левин, Р.Ф. Сагитов, А.М. Балгынова [и др.] // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. — 2019. — № 1. — С. 127–131.
10. Mahmood Y. Sustainable Development for Oil and Gas Infrastructure from Risk, Reliability, and Resilience Perspectives / Y. Mahmood, T. Afrin, Y. Huang, N. Yodo // Sustainability. — 2023. — Vol. 5. — P. 4953.
11. Vlahovic M.M. Durability of sulfur concrete in various aggressive environments / M.M. Vlahovic, S.P. Martinovic, T.D. Boljanac [et al.] // Construction and Building Materials. — 2011. — Vol. 25. — P. 3926–3934.
12. Turayev K.K. Sulfur Modification with Gossypol Resin or Pyrolysis Distillate and Sulfur Concrete Production / K.K. Turayev [et al.] // Universum: Technical Sciences. — 2022. — № 4(97).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Chernyavskij V.S. Mekhanizmy minimizacii posledstvij mirovogo finansovogo krizisa dlya ekonomiki Rossii [Mechanisms for Minimizing the Consequences of the Global Financial Crisis for the Russian Economy] / V.S. Chernyavskij, S.S. Shegurov, A.N. Solomoshchuk // Vestnik MIRBIS [Bulletin of MIRBIS]. — 2022. — № 1(29). — P. 67–77. [in Russian]
2. Borisov B.V. Institucional'nyj otvet na global'nye otraslevye vyzovy, stoyashchie pered predpriyatiyami neftegazopererabatyvayushchego segmenta [Institutional Response to Global Industry Challenges Facing Enterprises in the Oil and Gas Refining Segment] / B.V. Borisov, P.P. Luk'yanenok, E.E. Revin [et al.] // Ekonomika i upravlenie innovatsiyami [Economics and Innovation Management]. — 2025. — № 2(33). — P. 52–61. [in Russian]
3. Zhevanov V. Increasing the fatigue life of asphalt concrete by complex modification of their structure / V. Zhevanov, V. Bratchun, V. Postoenko // Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. — 2023. — № 4(162). — P. 70–75.
4. Veren'ko V.A. Issledovanie ustalostnoj dolgovechnosti asfal'tobetonov, modificirovannyh polimernymi dobavkami razlichnyh tipov [Investigation of Fatigue Life of Asphalt Concretes Modified with Polymer Additives of Various Types] / V.A. Veren'ko, A.V. Ladyshev, R.K. Gatalskij // Nauka i tekhnika [Science and Technology]. — 2018. — Vol. 17, № 6. — P. 451–457. [in Russian]
5. Kadyrov G.F. Sopostavitel'nye ispytaniya asfal'tobetona na ustalostnyuyu dolgovechnost' s primeneniem razlichnyh sovremennyh laboratornyh metodov [Comparative Tests of Asphalt Concrete for Fatigue Life Using Various Modern Laboratory Methods] / G.F. Kadyrov, E.N. Simchuk, A.N. Tiraturyan // Nauchnyj zhurnal stroitel'stva i arhitektury [Scientific Journal of Construction and Architecture]. — 2023. — № 4(72). — P. 121–132. [in Russian]
6. Nurmukhanov A. Physico-chemical and mechanical properties of sulfur asphalt concrete / A. Nurmukhanov, L. Tastanova // Internauka. — 2024. — № 2-3(319). — P. 51–52.
7. Sagyndykov A. Modified sulfur concretes with phosphoric slag filler / A. Sagyndykov, Zh.T. Suleimenov, G.M. Bayalieva [et al.] // Mekhanika i tekhnologii. — 2025. — № 1(87). — P. 171–179.
8. Le Hyu T. Fiziko-mekhanicheskie svoystva serobitumnyh vyazhushchih i seroasfal'tobetonov [Physical and Mechanical Properties of Sulfur-Bitumen Binders and Sulfur-Asphalt Concretes] / T. Le Hyu // Inzhenernyj vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]. — 2022. — № 6(90). — P. 646–664. [in Russian]
9. Levin E.V. Utilizaciya obezvozhennogo neftेशlama v dorozhnom stroitel'stve [Utilization of Dehydrated Oil Sludge in Road Construction] / E.V. Levin, R.F. Sagitov, A.M. Balgynova [et al.] // Vestnik Vostochno-Kazahstanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbaeva [Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University]. — 2019. — № 1. — P. 127–131. [in Russian]
10. Mahmood Y. Sustainable Development for Oil and Gas Infrastructure from Risk, Reliability, and Resilience Perspectives / Y. Mahmood, T. Afrin, Y. Huang, N. Yodo // Sustainability. — 2023. — Vol. 5. — P. 4953.
11. Vlahovic M.M. Durability of sulfur concrete in various aggressive environments / M.M. Vlahovic, S.P. Martinovic, T.D. Boljanac [et al.] // Construction and Building Materials. — 2011. — Vol. 25. — P. 3926–3934.
12. Turayev K.K. Sulfur Modification with Gossypol Resin or Pyrolysis Distillate and Sulfur Concrete Production / K.K. Turayev [et al.] // Universum: Technical Sciences. — 2022. — № 4(97).