

Битумное вяжущее для износостойкого асфальтобетона

Ю.Э. Васильев¹, У.О. Менькина¹, Г.А. Понарин¹, С.В. Ключев^{2,3}

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

³Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы

Аннотация: Современные дорожные покрытия подвергаются интенсивному износу из-за воздействия ошипованных шин и противогололедных реагентов, что приводит к значительным экономическим потерям. В России ежегодный ущерб от такого износа оценивается в сотни миллиардов рублей. Для повышения долговечности асфальтобетона исследуются методы модификации битумного вяжущего, включая добавление резиновой крошки, полимеров (SBS, EVA) и модифицированной серы.

Наиболее перспективным направлением признано использование модифицированной серы, которая улучшает износостойкость, трещиностойкость и устойчивость к противогололедным реагентам. В статье подробно рассмотрен процесс получения модифицированной серы, включая дегазацию и модификацию 5-этилиден-2-норборненом (ЭНБ). Лабораторные испытания показали, что оптимальное содержание серы в битуме составляет 25–30%, при этом 30% демонстрируют наилучшие характеристики: повышенную теплоустойчивость, сдвигоустойчивость и адгезию к минеральному заполнителю.

Результаты ИК-спектроскопии подтвердили физическое смешение серы с битумом без химических реакций. Применение модифицированной серы позволяет увеличить срок службы дорожных покрытий и снизить затраты на ремонт, что особенно актуально в условиях роста профицита серы на территории Российской Федерации.

Ключевые слова: дорожное покрытие, асфальтобетон, износостойкость, колея износа, ошипованные шины, модификация, дегазация, сера, битумное вяжущее, экология.

Введение

Современные дорожные покрытия подвергаются интенсивным механическим и климатическим воздействиям, что приводит к их постепенному износу. Одним из ключевых факторов, ускоряющих разрушение асфальтобетона, является использование ошипованных шин [1] и применение противогололедных реагентов (далее – ПГР) в зимний период. В Российской Федерации масштабы данной проблемы были оценены в ходе исследования, проведенного по заказу Федерального дорожного агентства в 2014 году. Согласно полученным данным, ежегодный ущерб от износа дорожных покрытий ошипованными шинами составил около 220 млрд рублей.

С учетом инфляционных процессов за период 2014–2024 годов ($\approx 118,03\%$, по данным Росстата и Банка России), в современных ценах этот показатель возрастает до $\approx 479,7$ млрд рублей в год. Столь значительные экономические потери актуализируют необходимость разработки более износостойких асфальтобетонных смесей, в частности, за счет оптимизации состава и свойств битумного вяжущего.

Одним из перспективных направлений снижения ущерба является разработка битумного вяжущего с повышенной стойкостью к механическим и химическим воздействиям. Это позволит минимизировать разрушение дорожного покрытия как от ошипованных шин, так и от противогололедных реагентов, увеличив срок службы асфальтобетона и снизив затраты на ремонт.

В данной статье рассматриваются перспективные решения в области улучшения свойств битумных вяжущих, направленные на повышение долговечности асфальтобетонных покрытий и снижение ущерба от воздействия ошипованных шин.

Основные способы улучшения характеристик битумного вяжущего

Битумное вяжущее является ключевым компонентом асфальтобетонных смесей, определяющим их прочность, долговечность и устойчивость к внешним воздействиям. Однако традиционные битумы обладают ограниченной устойчивостью к механическим нагрузкам (включая воздействие ошипованных шин) и химическим реагентам (таким как противогололедные составы). Для улучшения эксплуатационных характеристик битума применяются следующие способы улучшения характеристик битумного вяжущего:

- Добавление резиновой крошки (переработанные автомобильные шины);

- Введение полимерных модификаторов (каучук, стирол-бутадиен-стирол (SBS), этиленвинилацетат (EVA));

- Использование модифицированной серы.

1. Резиновая крошка (RTR – Recycled Tire Rubber)) [2,3].

Добавление резиновой крошки в количестве 5–20% от массы битумного вяжущего, что позволяет значительно улучшить эластичность, трещиностойкость и износостойкость покрытия.

Преимущества:

- повышение упругости битума и снижение температурной хрупкости;

- уменьшение колейности и трещинообразования;

- экологическая польза за счет утилизации старых шин.

Недостатки:

- высокие требования к дисперсности резины;

- необходимость специального оборудования для смешивания;

- возможность расслоение смеси при длительном хранении.

2. Полимерные модификаторы (SBS, EVA, каучук) [4-6]

Наиболее распространенным методом является введение стирол-бутадиен-стирола (SBS) в количестве 3–7% массы битумного вяжущего, что значительно улучшает эластичность и сопротивление усталостным нагрузкам.

Преимущества:

- высокая устойчивость к деформациям;

- улучшенная адгезия к минеральным заполнителям;

- повышение срока службы покрытия.

Недостатки:

- высокая стоимость полимеров;

- чувствительность к окислению и УФ-излучению;

– необходимость тщательного контроля температуры при производстве работ.

3. Модифицированная сера [7-9]

В асфальтобетонном дорожном покрытии модифицированная сера применяется в качестве компонента битумного вяжущего в количестве 25-30% от массы битумного вяжущего. Добавление серы приводит к значительному улучшению следующих характеристик: износостойкость, теплоустойчивость, трещиностойкость, стойкость к агрессивным средам и стойкость к колееобразованию.

Преимущества:

- экономическая выгода;
- повышенная стойкость к ПГР;
- сниженная температурная чувствительность.

В качестве основного недостатка возможно выделить, что при нагреве серы свыше 160°C возможно выделение сероводорода и диоксида серы.

Каждый из рассмотренных способов обладает определенными преимуществами и недостатками. Однако с точки зрения экологической и экономической эффективности, технологичности применения и комплексного улучшения эксплуатационных характеристик асфальтобетона дорожного покрытия, наиболее перспективным представляется использование модифицированной серы.

Необходимо отметить, что на территории Российской Федерации сера используется для производства минеральных удобрений (2,3 млн тонн), в металлургии (0,06 млн тонн), целлюлозно-бумажной (0,05 млн тонн) и химической промышленности (0,14 млн тонн). Избыток в 3,5 млн тонн реализуется на экспорт. К 2030 году профицит производства серы может составить до 19 млн тонн в год.

Модификация серы для асфальтобетонной смеси

Техническая сера может быть получена различными путями: самородная, из газовой, нефтяная, металлургическая, химической и другой промышленности. Для асфальтобетонных смесей наилучшим сырьем является газовая сера, так как она: имеет высокую чистоту с минимальным количеством вредных примесей (тяжелые металлы, H_2S); легко поддается дегазации и модификации (например, с ЭНБ); доступна в больших объемах благодаря развитой нефтегазовой отрасли.

Техническая сера в чистом виде непригодна для применения в дорожном строительстве, в связи с чем применение ее возможно только после соответствующей обработки, включающей дегазацию и модификацию.

Дегазация технической серы для асфальтобетонных смесей включает нагрев расплава до $140\text{--}160^\circ\text{C}$ с выдержкой в течение 4–6 часов для испарения сероводорода (H_2S) и других газов, при этом процесс может ускоряться барботажем инертным газом (азотом) или химической обработкой (аммиаком, окислителями). Альтернативно применяется вакуумная дегазация (0,05–0,1 МПа) или механическое перемешивание для удаления примесей. После обработки содержание H_2S не должно превышать 10 мг на 1 кг серы, что контролируется йодометрическим титрованием или газоанализаторами, после чего сера готова к модификации.

Процесс получения модифицированной серы [10] начинается с подготовки расплавленной серы. Для этого серу нагревают до температуры $120\text{--}135^\circ\text{C}$, чтобы перевести ее в расплавленное состояние, после чего подают в реактор. Поддержание указанного температурного диапазона обеспечивает оптимальную вязкость расплава, что облегчает дальнейшее введение модифицирующих добавок.

На следующем этапе в реактор вводят соли аммония и/или калия в количестве 0,001–0,005 мас.% от общей массы серы. Эти добавки играют

ключевую роль в процессе модификации, способствуя стабилизации структуры серы. После их внесения реакционную массу тщательно перемешивают в течение 5-10 минут, чтобы добиться равномерного распределения солей в расплаве.

Затем в систему добавляют 5-этилиден-2-норборнен (ЭНБ) в количестве 0,08-0,1 мас.% от массы серы. Этот модификатор вступает в реакцию с серой, формируя устойчивые химические связи. Для завершения процесса смесь перемешивают в течение 20-50 минут, что обеспечивает глубокую и равномерную модификацию всей массы серы.

В результате проведенных операций получают стабилизированную серу с улучшенными свойствами. Ключевым преимуществом данного способа является необратимость модификации, что исключает возврат серы в исходное состояние при дальнейшей переработке или хранении. Кроме того, предотвращается деструкция серы, которая обычно приводит к образованию нежелательных низкомолекулярных соединений.

Предложенный метод отличается простотой и эффективностью, что делает его перспективным для применения в различных отраслях, включая производство строительных материалов, резинотехнических изделий и серосодержащих композиций. Использование модифицированной серы позволяет повысить долговечность и эксплуатационные характеристики асфальтобетона дорожного покрытия.

Лабораторные испытания

В рамках исследования в лабораторных условиях были подготовлены образцы битумного вяжущего с различным процентным содержанием серы: 25%, 30% и 35%. Процесс приготовления начинался с нагрева битумного вяжущего до температуры 160°C, что обеспечивало его достаточную текучесть для последующего смешивания. После достижения нужной температуры состав тщательно перемешивали для равномерного

распределения компонентов. Затем в расплавленный битум добавляли необходимое количество серы в соответствии с заданными пропорциями. Для достижения однородной структуры смесь выдерживали в мешалке на малых оборотах в течение одного часа. Это позволяло сере полностью раствориться и равномерно распределиться в битумной матрице. После остывания приготовленное вяжущее приобретало характерный матовый блеск, что свидетельствовало о завершении процесса структурообразования и формировании устойчивой композиции.

После приготовления образцов серобитумного вяжущего были проведены их механические испытания по двум основным методикам: пенетрационной системе и системе PG (Performance Grade). Пенетрационные испытания позволили оценить твердость материала путем измерения глубины проникновения стандартной иглы под определенной нагрузкой. Этот метод дал представление о консистенции вяжущего при различных температурах и его устойчивости к деформациям. В рамках системы PG проводились комплексные испытания, включающие определение температурных характеристик, таких как верхний и нижний пределы эксплуатационной пригодности, а также оценку усталостной долговечности и устойчивости к образованию трещин. Полученные данные позволили проанализировать влияние процентного содержания серы на физико-механические свойства композита и определить оптимальное соотношение компонентов для дальнейшего применения в дорожном строительстве.

Результаты испытаний серобитумного вяжущего представлены в таблице 1.

Оптимальное содержание модифицированной серы в вяжущем составляет 25-35%, поскольку за пределами этого диапазона наблюдаются существенные изменения свойств материала. При концентрации серы менее 25% модифицирующий эффект выражен слабо – улучшение характеристик

вяжущего незначительно, а адгезионные свойства серы проявляются недостаточно.

Таблица 1

Результаты лабораторных испытаний битумного вяжущего

№ п/п	Наименование показателя	Содержание модифицированной серы в битуме БНД 70/100 по массе			БНД 70/100 контрольный образец	ГОСТ 33133-2014
		25%	30%	35%		
1	Глубина проникания иглы при 25°C, 0,1 мм	77	75	72	86	71-100
	Глубина проникания иглы при 0°C, 0,1 мм	29	26	24	27	>21
2	Температура размягчения по КИШ, °C	50	54	64	48	>47
3	Температура хрупкости по Фраасу, °C	-30	-24	-21	-22	<-18
4	Растяжимость при 25°C, см	32	17	12	64	>62
	Растяжимость при 0°C, см	1,7	2,3	2,4	5,0	>3,7
5	Индекс пенетрации	-0,109	0,623	1,946	-0,3402	-1,0<x<1,0
6	Динамическая вязкость, Па·С, при 135°C	0,1337	0,1299	0,1291	0,2263	
7	Динамическая вязкость, Па·С, при 165°C	0,05139	0,04807	0,04700	0,09951	
8	Сдвиговая устойчивость: (G/sinδ) при 10 рад/с, кПа	t=64	t=82	t=76	t=58	
		1,56	3,66	1,30	2,09	
9	Динамическая вязкость, при 60°C, Па·с	47,940	55,770	78,100	92,170	
10	Сцепление вяжущего с щебнем	5	5	4	3	
Битумное вяжущее, состаренное по методу RTFOT						
11	Изменение массы после старения, %	2,4	2,8	3,4	0,46	<0,6

Сравнение ИК-спектров исходного битумного вяжущего и модифицированного 30%-ной добавкой серы показало, что химический состав битума остаётся неизменным. Однако анализ выявил заметное усиление полос поглощения, характерных для серосодержащих групп, а также появление нового сигнала при 650 см⁻¹. Этот сигнал соответствует колебаниям молекулярной серы, что указывает на присутствие её кристаллической формы в композиции.

Также в работе исследовалось влияние модифицированной серы на свойства битумного вяжущего. Для анализа химического воздействия компонентов проводилась ИК-спектроскопия образцов с помощью Фурье-ИК

спектрометра в диапазоне от 400-4 000 см^{-1} . Были исследованы следующие концентрации модифицированной серы в битумном вяжущем: 0% и 30%.

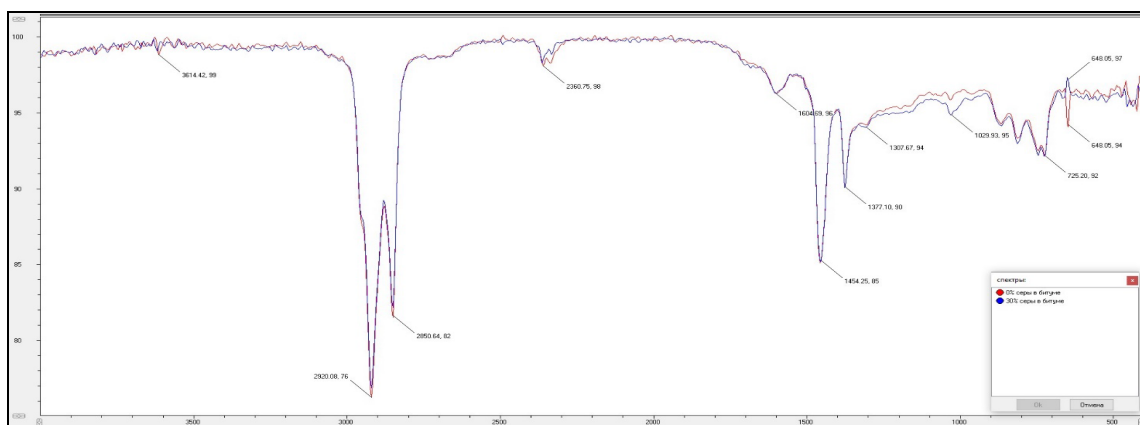


Рис. 1. – ИК-спектры битумного вяжущего
(0%; 30% модифицированной серы)

Полученные данные свидетельствуют, что введенная сера не вступает в химическое взаимодействие с компонентами битума. Наблюдаемый сигнал при 650 см^{-1} подтверждает наличие нерастворившейся кристаллической серы в составе модифицированного вяжущего. Эти выводы полностью согласуются с результатами ранее проведенных исследований данной системы, подтверждая физический характер смешения компонентов без образования новых химических соединений.

Таким образом, модификация битумного вяжущего серой в указанной пропорции не вызывает химических реакций, но приводит к физическому присутствию как растворённой, так и кристаллической форм серы в композиции.

С другой стороны, при превышении 35%-ного содержания возникает проблема кристаллизации избыточной серы. Это приводит к её выпадению в осадок, что ухудшает качество конечного продукта. В частности, отмечается снижение таких важных эксплуатационных показателей,

как сдвигоустойчивость композиции и адгезия к каменному материалу. Таким образом, для достижения оптимальных характеристик вяжущего необходимо строго соблюдать рекомендуемый диапазон содержания модифицированной серы.

В результате испытаний оптимальным содержанием серы в битумном вяжущем можно считать 30%.

Заключение

1. Эффективность модифицированной серы

Наиболее перспективным методом повышения долговечности асфальтобетонных покрытий является использование модифицированного серного вяжущего (25–35% серы). Оно улучшает трещиностойкость, теплоустойчивость, адгезию и стойкость к воздействию ошипованных шин и противогололедных реагентов.

2. Оптимальное содержание серы

Лабораторные испытания показали, что наилучшие эксплуатационные характеристики достигаются при содержании серы 30%. В этом диапазоне обеспечивается оптимальный баланс между механической прочностью, температурной устойчивостью и адгезионными свойствами без химического взаимодействия с битумом.

3. Экономическая и экологическая выгода

Применение серомодифицированного битума позволяет снизить затраты на ремонт дорог за счёт увеличения срока службы покрытий. Дополнительным преимуществом является использование избыточной серы, производимой в России (до 19 млн тонн к 2030 году), что делает технологию экономически и экологически целесообразной.

4. Технологичность и безопасность

Модификация серы (дегазация и введение стабилизирующих добавок) исключает выделение токсичных газов (H_2S , SO_2) при нагреве до $160^{\circ}C$. Это делает процесс безопасным для промышленного применения.

5. Физический, а не химический механизм действия

ИК-спектроскопия подтвердила, что сера не вступает в химическую реакцию с битумом с образованием новых химических элементов, а образует физическую смесь. Это означает, что её модифицирующее действие основано на изменении структуры композита, а не на образовании новых соединений.

6. Перспективы внедрения

Технология серомодифицированного битума может быть рекомендована для применения в дорожном строительстве, особенно в регионах с суровыми климатическими условиями и высокой нагрузкой от ошипованных шин. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию состава для различных типов асфальтобетонных смесей.

Литература

1. Васильев. Ю.Э., Понарин Г.А., Бутринов А.А., Болгак М.М. Лабораторная установка для испытаний дорожного покрытия под воздействием ошипованных шин // Транспортное строительство. 2022. №1. С. 10-13.
2. Руденский А.В., Никонова О.Н. Резинобитумные вяжущие. Различные варианты технологии приготовления // Труды РОСДОРНИИ. 2008. №19/1. С. 224-237.
3. Тарасов, Р. В., Макарова Л.В., Кадомцева А.А. Модификация битумов полимерами // Современные научные исследования и инновации. – 2014. – № 5-1(37). – С. 14.
4. Yang, Qilin Lin, Jiao Wang, Xiaowei Wang, Dawei Xie, Ning Shi, Xianming. 2024. A review of polymer-modified asphalt binder: Modification

mechanisms and mechanical properties. Cleaner Materials. 12. 100255. 10.1016/j.clema.2024.100255.

5. Akkenzheyeva, Anar Bussurmanova, Akkenzhe Haritonovs, Viktors Kuangali, Asyltas. 2024. Modification of oil bitumens with polymeric materials. Yessenov Science Journal. 49. 153-158. 10.56525/NVLS6037.

6. П. А. Дужий, Л. Р. Люсова, С. В. Чернышов [и др.]. Специфика топологии СБС-полимеров, проявляющаяся при модификации битумных вяжущих // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 7. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_89N6y24_duzhiy_lusova.pdf_d0a405d922.pdf

7. Скрипунов Д.А. Получение композиций на основе органических полисульфидов и серы для дорожных и строительных материалов: дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук: 05.17.06 / Скрипунов Денис Александрович. – М., 2016. – 130 с.

8. Ле Хыу, Т. Физико-механические свойства серобитумных вяжущих и сероасфальтобетонов // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 6. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_36__6_Le.pdf_786d708a64.pdf

9. Гладких В.А. Сероасфальтобетон, модифицированный комплексной добавкой на основе технической серы и нейтрализаторов эмиссии токсичных газов: дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук: 05.23.05. Пенза, 2015. 222 с.

10. Васильев Ю.Э., Мотин Н.В., Пекарь С.С., Шубин А.Н., Якоби В.В. ООО Научно Промышленное Предприятие «ПромСпецМаш». Способ получения модифицированной серы, С2 № 2554585 РФ (2013). МПК C08L 95/00, C04B 26/26, C08K 3/06, C01B 17/00. Заявка № 2013140117/05. Дата подачи заявки 30.08.2013. Дата публикации 27.06.2015, Бюл. №8. URL: patents.s3.yandex.net/RU2554585C2_20150627.pdf

References

1. Vasil'ev. Yu.E', Ponarin G.A., Butrinov A.A., Bolgak M.M. Transportnoe stroitel'stvo. 2022. №1. pp. 10-13.

2. Rudenskij A.V., Nikonova O.N. Rezinobitumny'e vyazhushhie. Trudy ROSDORNII. 2008. №19/1. pp. 224-237.
3. Tarasov, R. V. Sovremennyy'e nauchny'e issledovaniya i innovacii. 2014. № 5-1(37). P. 14.
4. Yang, Qilin Lin, Jiao Wang, Xiaowei Wang, Dawei Xie, Ning Shi, Xianming. 2024. Cleaner Materials. 12. 100255. 10.1016/j.clema.2024.100255.
5. Akkenzheyeva, Anar & Bussurmanova, Akkenzhe & Haritonovs, Viktors & Kuangali, Asyltas. 2024. Yessenov Science Journal. 49. 153-158. 10.56525/NVLS6037.
6. P. A. Duzhij, L. R. Lyusova, S. V. Cherny'shov [i dr.]. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 7. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_89N6y24_duzhiy_lusova.pdf_d0a405d922.pdf
7. Skripunov D.A. Poluchenie kompozicij na osnove organicheskix polisul'fidov i sery` dlya dorozhny`x i stroitel'ny`x materialov. [Production of Compositions Based on Organic Polysulfides and Sulfur for Road and Construction Materials [dissertation]: dis. na soisk. uch. st. kand. texn. nauk: 05.17.06. Skripunov Denis Aleksandrovich. M., 2016. 130 p
8. Le Xy`u, T. T. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 6. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_36__6_Le.pdf_786d708a64.pdf
9. Gladkix V.A. Seroasfal'tobeton, modificirovannyj kompleksnoj dobavkoj na osnove texnicheskoy sery` i nejtralizatorov e`missii toksichny`x gazov: dis. [Sulfur-asphalt concrete modified with a complex additive based on technical sulfur and toxic gas emission neutralizers [dissertation] na soisk. uch. st. kand. texn. nauk: 05.23.05. Penza, 2015. 222 p.
10. Vasil'ev Yu.E', Motin N.V., Pekar' S.S., Shubin A.N., Yakobi V.V. ООО Nauchno Promy'shlennoe Predpriyatie «PromSpeczMash». Sposob polucheniya modificirovannoj sery`, C2 № 2554585 RF (2013). MPK C08L 95/00, S04V 26/26, S08K 3/06, S01V 17/00. Zayavka № 2013140117/05. Data podachi zayavki



30.08.2013. Data publikacii 27.06.2015, Byul. №8. URL:
patents.s3.yandex.net/RU2554585C2_20150627.pdf [Method for Producing
Modified Sulfur]. Patent RU 2554585 C2 (2013).

Дата поступления: 5.08.2025

Дата публикации: 25.09.25