



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.72

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-55-66

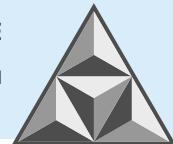
# Двойной крекинг как перспективный метод получения неокисленного битума для дорожного строительства

**А.В. Вихрев, Ю.С. Кандрашкина**

**Александр Владимирович Вихрев\*, Юлия Сергеевна Кандрашкина**

Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир,  
Российская Федерация

*user1268@gmail.com\*, juliakandrashkina@gmail.com*



Представлено комплексное исследование инновационной технологии получения неокисленного битума, основанной на методе двойного крекинга (2К) нефтяных остатков (гудрон, мазут). Приведено сравнение 2К-битума с окисленными битумами марки БНД (ГОСТ 33133-2014). Подробный анализ молекулярной структуры традиционных и модифицированных битумов выявил нестабильность последних, где полимерные добавки лишь кратковременно поддерживают природную структуру. В отличие от традиционных битумов, неокисленный битум, полученный методом двойного крекинга, характеризуется оптимальным соотношением асфальтенов и мальтенов, что определяет его эксплуатационные свойства, ценные для дорожного строительства. Детально описаны этапы процесса двойного крекинга, представлен материальный баланс, а также сформулированы требования к качеству неокисленного битума для строительства дорог. Значимый социально-экономический эффект выражается в повышении долговечности дорожных покрытий и снижении затрат на их содержание.

**Ключевые слова:** битум, крекинг, гудрон, мазут, автомобильные дороги, дорожное полотно

**Для цитирования:**

Вихрев А.В., Кандрашкина Ю.С. Двойной крекинг как перспективный метод получения неокисленного битума для дорожного строительства // Умные композиты в строительстве. 2025. Т. 6, вып. 4. С. 55-66. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-55-66



SCIENTIFIC ARTICLE

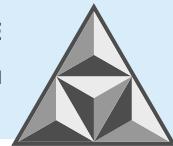
DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-55-66

# Double cracking as a promising production method non-oxidized bitumen for road construction

**A.V. Vikhrev, Yu.S. Kand rashkina**

**Aleksandr Vladimirovich Vikhrev\*, Yulia Sergeevna Kand rashkina**

Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov, Vladimir, Russian Federation  
*user1268@gmail.com\**, *juliakand rashkina@gmail.com*



*The paper presents a comprehensive study of an innovative technology for producing unoxidised bitumen based on the double cracking (2K) method of petroleum residues (tar, fuel oil). The authors compare 2K bitumen with oxidised bitumen of the BND grade (GOST 33133–2014). A detailed analysis of the molecular structure of traditional and modified bitumens revealed the instability of the latter, where polymer additives only temporarily support the natural structure. Unlike traditional bitumens, unoxidised bitumen obtained by double cracking is characterised by an optimal ratio of asphaltenes and maltenes. This determines its operational properties, which are valuable for road construction. The paper describes in detail the stages of the double cracking process and presents the material balance. The authors also formulated requirements for the quality of unoxidised bitumen for road construction. A significant socio-economic effect is achieved by increasing the durability of road surfaces and reducing the costs of their maintenance.*

**Keywords:** bitumen, cracking, tar, fuel oil, highways, roadbed

**For citation:**

Vikhrev A.V., Kand rashkina Yu.S. Double cracking as a promising production method non-oxidized bitumen for road construction // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 4. P. 55-66.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-55-66



## ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на разработку альтернативных материалов, нефтяной битум продолжает оставаться основным вяжущим компонентом при строительстве дорожных покрытий, что объясняется его потребительскими свойствами и экономической целесообразностью применения. За исключением цементного бетона, остаточные продукты переработки нефти наиболее широко используют для решения указанной задачи в строительной сфере [1].

Более того, разработка нового вяжущего материала, обладающего аналогичными свойствами, в настоящее время представляется сложным и экономически нецелесообразным вариантом. Это подчеркивает значимость исследований, направленных на улучшение эксплуатационных характеристик битумов и разработки инновационных технологий, позволяющих максимально эффективно использовать данный природный ресурс [2].

На сегодняшний день фактический срок службы асфальтобетонных покрытий не соответствует нормативным показателям. На магистралях высшей категории повреждения фиксируются уже через два-три года, а на сильно загруженных участках (например, МКАД) колея образуется в течение нескольких месяцев после проведения ежегодного ремонта.

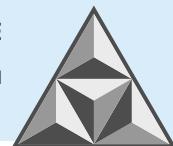
В зимний период колейные деформации и растрескивание способствуют возникновению аварийного состояния дорожного покрытия.

Преждевременный выход автодорог из строя характеризуется разрушением битумной и битумоминеральной составляющих асфальтобетона, вызванным деформациями и растрескиванием. Деформации под воздействием высоких и низких температур являются основным фактором, лимитирующим эксплуатационные свойства асфальтобетонных материалов. Его устранение позволит значительно увеличить срок службы и качество дорожных покрытий, повысить безопасность движения и обеспечить существенную экономию ресурсов на строительство и содержание автомобильных дорог.

Автомобильные дороги подвергаются значительным нагрузкам, обусловленным деформацией земляного полотна, предотвращение которой путем повышения жесткости конструкции не представляется возможным. Обеспечение целостности структуры дорожного покрытия достигается за счет пластической деформации материала, компенсирующей усилия сжатия и растяжения. Динамические и статические транспортные нагрузки, в совокупности с деформациями грунта, определяют требования к реологическим свойствам дорожного полотна в широком температурном диапазоне.

Упруго-пластичные свойства вяжущего компонента, обеспечивающие устойчивость к деформациям, растрескиванию и атмосферному старению и сохранение целостности дорожного покрытия, являются ключевым фактором. Разработка долговечных битумов и на их основе вяжущих материалов, обладающих указанными свойствами в диапазоне температур  $-50\ldots+75^{\circ}\text{C}$ , является приоритетным направлением исследований в области нефтепереработки и дорожного строительства [3].

В настоящее время задача обеспечения качества и восстановления дорожных покрытий осложняется сезонным дефицитом и высокой стоимостью битумов и минеральных наполнителей. Полимерно-битумные вяжущие (ПБВ), обладающие улучшенными характеристиками, производятся в ограниченных объемах и характеризуются высокой стоимостью, превышающей таковую для традиционных битумов (БНД) в два раза. Недостаток



качественных вяжущих создает значительные проблемы для развития дорожного строительства.

К основным проблемам современных дорожных материалов относятся:

- Необходимость производства широкой номенклатуры битумов для различных климатических зон.

- Недостаточная адгезия к заполнителям в асфальтобетонах.

- Высокая стоимость.

- Неэффективная логистика поставок на этапе активного дорожного строительства.

Компонентный состав определяет физико-химические свойства нефтяного битума. Так, БНД представляет собой сложную многокомпонентную коллоидную систему, не имеющую четкой температуры фазового перехода. Его структура – коллоидный раствор сложных соединений (асфальтенов) в смеси высокомолекулярных углеводородов (мальтенов).

Асфальтены, находясь в твердом состоянии в изучаемом температурном диапазоне, выступают в качестве структурообразующих элементов, определяющих молекулярный каркас битума. Конфигурация каркаса формируется в зависимости от размеров и формы асфальтеновых агрегатов (АА) [4].

Предполагается, что однородные АА, характеризующиеся близкой молекулярной массой и правильной геометрической формой, формируют изотропную структуру с минимальными внутренними напряжениями. Пространство между частицами каркаса заполняют мальтены, находящиеся на начальном этапе отверждения в жидкой фазе. По мере снижения температуры происходит кристаллизация отдельных компонентов мальтеновой фракции.

Компонентный состав битума включает смолы (См), представленные преимущественно гетероциклическими и гибридными соединениями. Эти соединения, содержащие атомы серы, азота, кислорода и металлов, определяют полярность и поверхностную активность смол. Асфальтены, являясь высокомолекулярными компонентами битума, схожи по составу и структуре со смолами, но отличаются более высокой молекулярной массой. Под воздействием УФ-излучения асфальтены подвергаются деградации, что приводит к потере их растворимости в бензole [5].

Свойства нефтяного битума зависят от концентрации асфальтенов, соотношения различных групп углеводородов, а также от химической природы, размера и формы молекул асфальтенов. Размеры макромолекул асфальтенов, на несколько порядков превосходящие размеры обычных молекул, оказывают значительное влияние на физические и реологические свойства битума. Эти факторы определяют тиксотропию, синерезис и другие особенности поведения битумных материалов [6].

Оптимальный компонентный состав битума характеризуется соотношением: 25-30% АА + 40-50% См + 20-30% ароматических углеводородов (Ар). Асфальтены с "правильной" формой и близкими размерами формируют каркас с равномерным распределением напряжений и минимальной свободной энергией, что обеспечивает высокую пластичность, трещиностойкость и стабильность механических свойств в широком диапазоне температур эксплуатации дорожных покрытий. Природный парамагнетизм асфальтенов способствует приданию эффективных адгезионных свойств неокисленным битумам.

Для производства нефтяного битума используют различные тяжелые нефтяные остатки, такие как гудрон и кубовый остаток вакуумной перегонки нефти.



В настоящее время в мировой нефтеперерабатывающей промышленности применяют два подхода к производству битумных вяжущих:

- *Окисление: удаление летучих компонентов из тяжелых нефтяных остатков в реакторах.* Неселективность процесса вызывает «уплотнение» асфальтенов, снижая растяжимость и повышая хрупкость. Для компенсации применяется компаундирование (добавление неокисленного гудрона/полимеров).
- *Технология получения неокисленных (дистиллятных) битумов.* Основана на вакуумной перегонке битуминозных нефтей, с последующей корректировкой свойств за счет остатков деасфальтизации. Недостатком данного метода является ограниченность сырьевой базы.

Ключевым фактором при производстве вяжущего является сохранение однородной формы и монодисперсности асфальтенов, что минимизирует внутренние напряжения в твердом битумном каркасе. Молекулярная масса компонентов битума оказывает существенное влияние на его свойства. С целью оптимизации характеристик битума следует поддерживать молекулярную массу смол в диапазоне 800-2000 г·моль<sup>-1</sup>, а для ароматических углеводородов – 300-1000 г·моль<sup>-1</sup>.

Поверхностный крекинг тяжелых нефтяных остатков (2К-крекинг) представляет собой технологию деструкции связей С-С, в которой движущей силой является поверхностная энергия ( $E_6$ ) на границе раздела фаз (пена). Реагенты, находящиеся в поверхностном слое, подвергаются термодеструкции с более низким энергетическим барьером (на 40-100 кДж·моль<sup>-1</sup>), что позволяет снизить температуру термолиза (до 390-430°C) и уменьшить коксообразование [6].

Дополнительный эффект в зоне контакта обусловлен ориентацией реагентов (эффект ПАВ), при которой алкильные группы направлены в газовую фазу, что повышает скорость разрушения исходной системы.

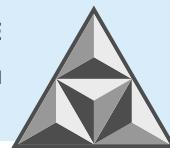
Для 2К-крекинга характерны следующие процессы:

- Полностью разрушаются высокомолекулярные парафины, образуя дистилляты (НК-500) с минимальным содержанием олефинов.
- В результате термодеструкции происходит распад нафеноароматических фрагментов смол и асфальтенов. Этот процесс инициирует образование нового потока асфальтенов, тяжелых смол и высокомолекулярных ароматических углеводородов, характеризующихся пониженным содержанием водорода. Вышеуказанные продукты реакции удаляются из реакционной зоны.
- Коксообразование блокируется благодаря поверхностной энергии и пониженной температуре.

Нисходящий поток тяжелых смолистых остатков (АА+См+Ар) представляет собой неокисленный битум с регулируемым компонентным составом, не зависимым от характеристик исходного сырья, где концентрация компонентов контролируется высотой пенного столба (временем крекинга) [7].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Кафедрой "Автомобильные дороги" (ВлГУ) совместно с ООО «НПО Поверхность» (Владимир) разработан проект малотоннажной установки 2К-крекинга тяжелых нефтяных остатков (гудрона) для организации децентрализованного производства вяжущего материала вблизи асфальтобетонных заводов (АБЗ) и площадок хранения минеральных компонентов.



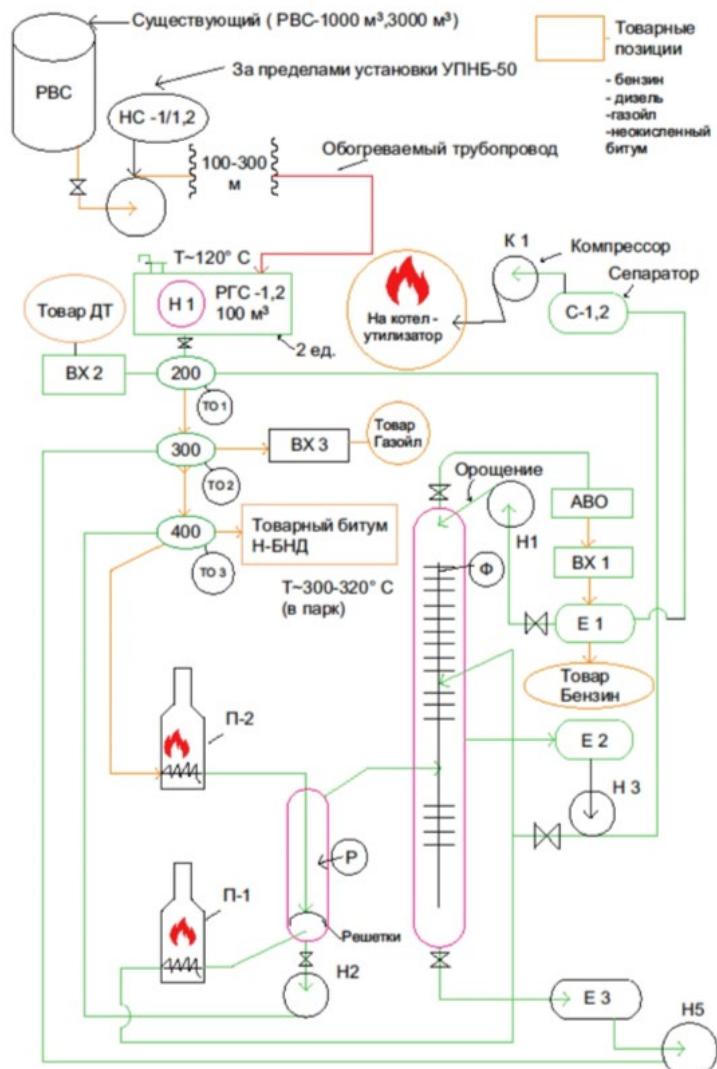
Данный подход позволяет:

- повысить гибкость и качество производства асфальтобетонных смесей за счет оперативного изменения ассортимента вяжущих;
  - снизить логистическую нагрузку, связанную с доставкой битума на АБЗ в период активного дорожного строительства;
  - исключить необходимость длительного хранения готового битума;
  - снизить стоимость вяжущего.

Для получения неокисленного дорожного битума планируется создание опытно-промышленной установки 2К-крекинга тяжелых нефтяных остатков. В качестве прототипа выбрана установка МПК-100 с производительностью по сырью 100 кг·ч<sup>-1</sup>. В качестве сырья предусмотрено использование гудрона (кубовый остаток АВТ) и других тяжелых нефтяных остатков, таких как мазут.

Экономическая оценка эффективности предложенной технологии проведена на основе расчета материального и энергетического баланса процесса переработки на установке МПК-100.

Сырье транспортируется на площадку и перекачивается в теплоизолированные резервуары РГС-50 (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема процесса двойного крекинга



Температура (100-150°C) поддерживается циркуляцией по контуру РГС – Н – Ф – П-0/1 (сырьевой контур) с использованием электронагревателя П-0/1. Сырьевой контур обеспечивает подачу сырья на узел компаундирования и отпарку воды. Перемешивание обеспечивает гомогенизацию, выравнивание состава и поддержание температуры [8].

На узле компаундирования происходит смешение гудрона с газойлем (20-25 мас%). Смесь направляется в реактор крекинга Р через теплообменник Т-1 и электронагреватель П-1. В реакторе Р смесь преобразуется в пену с помощью барботажного узла (парообразная дизельная фракция 150-350°C, нагретая в аппарате П-2 до 500-550°C). Благодаря образованию пенообразной системы достигается значительная поверхность раздела фаз.

В реакторе Р на поверхности раздела фаз происходят реакции крекинга мальтенов и деалкилирования асфальтенов. Рабочее давление в системе составляет 0.2-0.3 МПа.

Процесс поверхностного крекинга базируется на принципе снижения энергии активации ( $E_a$ ) деструктивных реакций, чему способствует высокая (20-40 мДж·м<sup>-2</sup>) поверхностная энергия межфазной границы. Снижение  $E_a$  (в сравнении с энергией разрыва связи С-С, около 400 кДж·моль<sup>-1</sup>) достигает 10-20%. Это позволяет снизить температуру процесса до 390-430°C, увеличивая глубину реакций. Реагенты транспортируются к поверхности раздела фаз под действием адсорбционного поля. Данный подход способствует минимизации коксообразования и улучшению качества получаемого неокисленного битума [9].

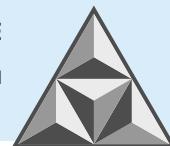
В процессе крекинга формируются два потока:

- парожидкостной (дизель 150-350°C, газойль 350-500°C), покидающий реактор через верхний штуцер и подаваемый во фракционатор Ф (ректификационная колонна, три тарелки). Разделение на фракции происходит в рабочей полости фракционатора;

- жидккая смесь вторичных асфальтенов, тяжелых нефтяных смол и полимолекулярных ароматических соединений (целевой продукт – неокисленный битум "ПЕРСПЕКТИВА"), локализованная в нижней части реактора Р; откачивается насосом в товарный парк через теплообменник Т-1 (рис. 1).

Фракции дизельного топлива и газойля извлекаются из фракционатора в жидкой фазе в рефлюксные емкости Е2 и Е3 соответственно. Емкость Е2 представляет собой блочную стриппинг-секцию, пары которой – керосиновая фракция. Избыток дизельного топлива из Е2 подается в нагреватель П-2 для создания барботирующего агента [8]. Газойль из емкости Е3 откачивается насосом и направляется на смешение с потоком исходного сырья на узле компаундирования. Избыток газойля поступает в товарный парк установки МПК-100. Непосредственно перед подачей в фракционатор около 10% газойля (при температуре 300°C) направляется в трубопровод реактора для подавления нежелательных реакций конденсации продуктов деструкции («квенч»).

Поток Б (газопаровой, микрокапельный), выходящий из фракционатора в газообразной фазе (температура 130-150°C), направляется в воздушный холодильник-конденсатор BX1, а затем – в емкость Е1 и сепаратор С1. Сконденсированная фракция Б + газы из аппарата BX1 поступает в рефлюксную емкость Е1, где происходит разделение фаз. Бензин из Е1 откачивается насосом в товарный парк и используется для орошения верхней части фракционатора. Газовая смесь с парами бензина поступает в сепаратор С1, где происходит полное отделение жидкой фазы (бензина). Оставшийся газовый поток направляется на факельную систему, как это описано в работе [10]. Материальный баланс характеризуют данные, представленные в табл. 1.

**Таблица 1.** Материальный баланс установки МПК-100**Table 1.** Material balance of the MPC-100 unit

| Нефтепродукты,<br>мас% выхода   |       | Подача основного технологического насоса<br>(производительность установки МПК-100 по сырью): от 100 до 500 кг·ч <sup>-1</sup> |             |            |              |  |
|---------------------------------|-------|---|-------------|------------|--------------|--|
|                                 |       | В час, кг   | За сутки, т | В месяц, т | В год, т     | Примечания   |
| Газы С1 – С4 (H <sub>2</sub> S) | 5-7   | 5-35  | 0.12-0.84   | 3.6-25.2   | 43.2-302.4   | На факел (можно предусмотреть котел водонагреватель) |
| 30-180 (бензин)                 | 7-10  | 7-50  | 0.17-1,20   | 5.0-36.0   | 64.8-432.0   | Растворитель – для технических нужд                  |
| 180-350 (дизель)                | 15-17 | 15-85   | 0.36-2.04   | 10.8-61.2  | 129.6-734.4  | Топливо для сельскохозяйственной техники             |
| 350-500 (газойль)               | 20-22 | 20-110  | 0.48-2.64   | 14.4-79.2  | 172.8-950.4  | Топливо для сельскохозяйственной техники             |
| Неокисленный битум 2К           | 50-55 | 50-275  | 1.2-6.6     | 36.0-198.0 | 432.0-2376.0 | ДСУ – 3  |
| Итого, т                        |       | 100-500   | 2.4-12.0    | 72.0-360.0 | 864.0-4320.0 | 4000 т, с учетом ремонтов                            |

Для оценки экономической эффективности опытно-промышленной установки МПК-100, работающей в сезонный период (апрель-ноябрь), приняты следующие параметры переработки: сырье (гудрон) – 3000 т; выход продуктов: УВГ С1 – С4 (H<sub>2</sub>S) – 150 т; фракция 30-180 (бензин) – 250 т; фракция 180-350 (дизель) – 500 т; фракция 350-500 (газойль) – 600 т; дорожный битум 2К – 1500 т. В табл. 2 приведены показатели дорожного битума, регламентируемые в соответствии с ГОСТ 33133-2014 и ГОСТ 52056-2003.

**Таблица 2.** Основные показатели товарного дорожного битума**Table 2.** The main indicators of commercial road bitumen

| Показатель                                 | Норма для битума марки         |                            | Требования НПО «Поверхность»          | Примечания  |
|--|--------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|---|
|  | ГОСТ 33133-2014<br>БНД 100/130 | ГОСТ 52056-2003<br>ПБВ 130 | ТУ (в разработке)<br>2К-битум 100/130 |   |
| Твердость (пенетрация), 0.1 мм             |                                |                            |                                       |   |
| 0°C  | ≥ 30                           |                            | ≥ 50                                  | 50°C – рабочая температура асфальтобетонного покрытия в жаркий летний день. Битум должен оставаться в твердом состоянии при этой температуре, чтобы не допустить необратимой деформации |
| 25°C                                       | 101-130                        |                            | ≥ 130                                 |   |
| 50°C                                       | ∞ (жидкость)                   | ∞ (жидкость)               | ∞ (жидкость)                          | 100-130   |
| 50°C                                       |                                |                            | 150-200                               |   |
| Растяжимость (дуктильность), см, не менее  |                                |                            |                                       |   |
| 0°C  | ≥ 4                            |                            | ≥ 20                                  | Растяжимость – способность сохранять структурную целостность при деформации в диапазоне от -50 до +70 °C; определяет прочность битума и смесей на его основе                            |
| 25°C                                       | ≥ 70                           |                            | ≥ 30                                  |   |
| 50°C                                       | ∞ (жидкость)                   | ∞ (жидкость)               | 70                                    |   |
| Температура размягчения на приборе КИШ, °C | ≥ 45                           | ≥ 49                       | ≥ 70                                  | Под солнцем температура покрытия может достигать 70°C. Считаем это «порогом» температуры, обеспечивающим прочность покрытия   |
| Температура хрупкости, °C, не выше         | -20                            | -30                        | ≤ -35                                 | Необходимо понизить порог хрупкости покрытия  |



Эти показатели даны в сравнении с требованиями к физико-химическим параметрам вяжущего материала, обоснованными фактическими условиями эксплуатации дорожных покрытий в средней полосе Российской Федерации.

Несмотря на экспериментальный характер, работа установки МПК-100 характеризуется экономичностью. Планируемый объем производства неокисленного битума составляет 1500-1600 т в год [11].

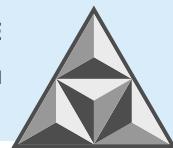
## ВЫВОДЫ

Использование технологии двойного крекинга показало возможность производить высококачественный неокисленный битум Н-БНД для дорожного строительства; ключевым преимуществом является формирование сбалансированного компонентного состава. При содержании асфальтенов 25-30% в составе битума Н-БНД обеспечиваются его повышенная твердость и температура размягчения, прочность при воздействии высоких температур. Отсутствие парафинов в дорожном битуме Н-БНД, обусловленное 2К-катализом, повышает на 75% его морозостойкость по сравнению с битумом БНД. Наличие смол гарантирует пластичность и растяжимость дорожного материала Н-БНД в широком температурном диапазоне.

Благодаря сбалансированному составу и ненарушенной структуре битума Н-БНД исключается необходимость введения полимерных добавок и ПАВ, что снижает себестоимость дорожных работ. Полученный битум демонстрирует более высокую (на 125%) эффективность, чем битум БНД, и на 62% выше, чем таковая для полимерно-бетонного вяжущего. Таким образом, внедрение 2К-технологии для производства неокисленного битума является перспективным решением в контексте улучшения качества дорожных покрытий, увеличения срока их службы, снижения расходов и зависимости от локальных источников сырья.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Яконцева О.В., Щепетева Л.С. Влияние зернового состава асфальтобетона на показатели физико-механических свойств // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2020. № 3. С. 71-76. <https://doi.org/10.15593/24111678/2020.03.09>.
2. Беляев П.С., Полушкин Д.Л., Макеев П.В., Фролов В.А. Модификация нефтяных дорожных битумов полимерными материалами для получения асфальтобетонных покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками // Вестник ТГТУ. 2016. Т 22. № 2. С. 264-271.
3. Соломенцев А.Б., Куликова А.В. Функциональные значения полимерных добавок // Автомобильные дороги. 2015. № 1. С. 64-69.
4. Проваторова Г.В., Вихрев А.В. Modification of Bitumen for Road Construction // Межд. науч.-тех. конф. MPCPE: Inter. Conf. on Mat. Phys., Build. Struct. and Technol. in Constr., Industr. and Prod. Eng. 2021.
5. Фокин М.Д., Вихрев А.В., Кандрашкина Ю.С., Ильичев Д.А. Перспективность использования неокисленных битумов в дорожном строительстве // Inter. Conf. on Mat. Phys., Build. Struct. and Technol. in Constr., Industr. and Prod. Eng. (MPCPE-2024): сб. тр. V Междунар. науч.-техн. конф. 23-25 апр. 2024 г., Владимир, ВлГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. Владимир: Аркаим, 2024. С 237-242.
6. Пат. 2645338 РФ. Способ термического крекинга органических полимерных отходов / Крючков В.А.; опубл. 09.12.2016.
7. Вихрев А.В., Фокин М.Д. Опытно-промышленная установка для получения неокисленных битумов // Дни науки студ. Владимир. гос. ун-та им. А.Г. и Н.Г. Столетовых: сб. мат. науч.-практ. конф. Владимир: ВлГУ, 2024. С. 955-961.
8. Пат. 2761921 РФ. Способ получения многофункциональной нанодисперсной каталитической системы на основе нативных хелатных комплексов металлов в условиях термолиза углеводородного сырья / Петухов Р.В., Королев Д.С.; опубл. 14.12.2021.



9. **Елсуфьев К.А., Муравьева Я.И., Вдовых П.Е.** Метод оптимизации Нелдера-Мида // Прорывные научные исследования: проблемы, закономерности, перспективы: сб. ст. IX Межд. науч.-практ. конф.: в 4 ч. Пенза, 30 дек. 2017 года. Ч. 1. Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.), 2017. С. 113-116.
10. **Yongchun Cheng, Di Yu, Guojin Tan, Chunfeng Zhu.** Low-Temperature Performance and Damage Constitutive Model of Eco-Friendly Basalt Fiber – Diatomite – Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles, Art. (PDF Available) // Materials 11 (11):2148, October 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11112148>.
11. **Yafeng Gong, Haipeng Bi, Zhenhong Tian, Guojin Tan.** Pavement Performance Investigation of Nano-TiO<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub> and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles // Appl. Sci. 8 (12):2581, Dec. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8122581>.

Поступила в редакцию 11.07.2025

Одобрена после рецензирования 27.11.2025

Принята к опубликованию 12.12.2025

## REFERENCES

1. **Yakontseva, O.V. and Shchepeteva, L.S.** (2020), "Influence of the grain size distribution of asphalt concrete on the physical and mechanical properties", *Transport. Transport structures. Ecology*, no. 3, pp. 71-76. DOI: <https://doi.org/10.15593/24111678/2020.03.09> (in Russian).
2. **Belyaev, P.S., Polushkin, D.L., Makeev, P.V. and Frolov, V.A.** (2016), "Modification of petroleum road bitumen with polymer materials to obtain asphalt concrete pavements with improved performance characteristics", *Bull. TSTU*, vol. 22, no. 2, pp. 264-271 (in Russian).
3. **Solomentsev, A.B. and Kulikova, A.V.** (2015), "Functional Values of Polymer Additives", *Automobile Roads*, vol. 1, pp. 64-69 (in Russian).
4. **Provatorova, G.V. and Vikhrev, A.V.** (2021), "Modification of Bitumen for Road Construction", *Inter. Sci. and Techn. Conf. MPCPE: Inter. Conf. on Mat. Phys., Build. Struct. and Technol. in Constr., Industr. and Prod. Eng.*
5. **Fokin, M.D., Vikhrev, A.V., Kand rashkina, Yu.S. and Ilyichev, D.A.** (2024), "Prospects of Using Unoxidized Bitumens in Road Construction", *Inter. Conf. Mat. Phys., Build. Struct. and Technol. in Constr., Industr. and Prod. Eng. (MPCPE-2024)*: Coll. Proc. of the V Inter. Sci. and Techn. Conf. April 23-25. 2024, Vladimir, Vladimir State Univer. named after A.G. and N.G. Stoletov. Vladimir: Arkaim, pp. 237-242 (in Russian).
6. Pat. 2645338 Russia. Method for Thermal Cracking of Organic Polymer Waste / **Kryuchkov, V.A.**; publ. 09.12.2016.
7. **Vikhrev, A.V. and Fokin, M.D.** (2024), "Pilot-industrial unit for producing unoxidized bitumen", *Sci. Days of Students of Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov: Coll. Mat. Sci. Pract. Conf.* Vladimir: VlSU, pp. 955-961 (in Russian).
8. Pat. 2761921 Russia. Method for Obtaining a Multifunctional Nanodispersed Catalytic System Based on Native Metal Chelate Complexes under Thermolysis Conditions of Hydrocarbon Feedstock / **Petukhov, R.V. and Korolev, D.S.**; publ. 14.12.2021.
9. **Elsufiev, K.A., Muravyova, Ya.I. and Vdovikh, P.E.** (2017), "Nelder-Mead Optimization Method", *Breakthrough Sci. Res.: Problems, Patterns, Prospects: Coll. of Articles from the IX Inter. Sci. Pract. Conf.: in 4 parts.* Penza, December 30, Part 1. Penza: "Science and Enlightenment" (IP Gulyaev G.Yu.), pp. 113-116 (in Russian).
10. **Yongchun, Cheng, Di, Yu, Guojin, Tan and Chunfeng, Zhu** (2018), "Low-Temperature Performance and Damage Constitutive Model of Eco-Friendly Basalt Fiber – Diatomite – Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles", Art. (PDF Available), *Materials*, vol. 11, no. 11, p. 1148. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11112148>.
11. **Yafeng, Gong, Haipeng, Bi, Zhenhong, Tian and Guojin, Tan** (2018), "Pavement Performance Investigation of Nano-TiO<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub> and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles", *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 12, p. 2581. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8122581>.

Received 11.07.2025

Approved 27.11.2025

Accepted 12.12.2025