



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 678: 625.7/8

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.030

EDN: UBOGSM

ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО И ЛАБОРАТОРНОГО СТАРЕНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРНЫЙ СОСТАВ И ПОКАЗАТЕЛИ БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ

Дмитрий Юрьевич Небрatenко ¹, Егор Олегович Прокудин ²,
Андрей Валерьевич Харпаев ³, Анатолий Александрович Новиковский ⁴,
Владимир Анатольевич Петров ⁵

¹ Российский университет транспорта (РУТ МИИТ), Москва, Россия

^{1,5} Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (РХТУ), Москва, Россия

² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

³ Автономная некоммерческая организация «Научно-исследовательский институт транспортно-строительного комплекса» (АНО «НИИ ТСК»), Москва, Россия

⁴ ООО «ПИДЖИ», Москва, Россия

¹ nebratenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3607-8876>

² prokudin.egor2112@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8419-1725>

³ bitumbinder@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0004-2793-6148>

⁴ novikovskiy@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7891-6661>

⁵ petrov.v.an@muctr.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4292-2575>

Аннотация. В статье представлены данные по термическому и термоокислительному старению битумов нефтяных дорожных вязких окисленных, полученные в ходе их как естественного, так и лабораторного старения с применением исследовательских и стандартизованных методов. Анализ рассмотренных в процессе старения характеристик позволил оценить закономерности изменения химической структуры, элементного состава, молекулярной массы, а также макроскопических и микроскопических характеристик вяжущего. Показано, что естественное старение вызывало более значительные химические изменения битума, чем лабораторное краткосрочное старение, но проявило менее выраженное формирование макромолекулярных структур в ходе реакций окисления. Условия термоокислительного процесса определены основным фактором в ходе естественного старения.

Ключевые слова: битумы нефтяные дорожные вязкие окисленные, естественное старение, ИК-спектроскопия, термогравиметрический анализ, RTFOT, PAV.

Для цитирования: Влияние естественного и лабораторного старения на микроструктурный состав и показатели битумных вяжущих / Д. Ю. Небрatenко [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 211–216. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.030. EDN: <https://elibrary.ru/UBOGSM>.

Original article

EFFECT OF NATURAL AND LABORATORY AGING ON MICROSTRUCTURAL COMPOSITION AND PERFORMANCE OF BITUMEN BINDERS

Dmitry Yu. Nebratenko ¹, Egor O. Prokudin ², Andrey V. Kharpaev ³,
Anatoly A. Novikovskiy ⁴, Vladimir A. Petrov ⁵

¹ Russian University of Transport (RUT MIIT), Moscow, Russia

^{1,5} D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (RHTU), Moscow, Russia

² Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

³ Autonomous Non-profit Organization "Scientific Research Institute of the Transport and Construction Complex" (ANO "TSK Research Institute"), Moscow, Russia

⁴ PIDZHI LLC, Moscow, Russia

¹ nebratenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3607-8876>

² prokudin.egor2112@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8419-1725>

³ bitumbinder@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0004-2793-6148>

⁴ novikovskiy@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7891-6661>

⁵ petrov.v.an@muctr.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4292-2575>

© Небрatenко Д. Ю., Прокудин Е. О., Харпаев А. В., Новиковский А. А., Петров В. А., 2026

Abstract. The article presents data on the thermal and thermo-oxidative aging of petroleum road viscous oxidized bitumen obtained both during their natural and laboratory aging using research and standardized methods. The analysis of the characteristics considered in the aging process made it possible to evaluate the patterns of changes in the chemical structure, elemental composition, molecular weight, as well as macroscopic and microscopic characteristics of the binder. It was shown that natural aging caused more significant chemical changes in bitumen than laboratory short-term aging, but showed less pronounced formation of macromolecular structures during oxidation reactions. The conditions of the thermal oxidation process are determined by the main factor in the course of natural aging.

Keywords: petroleum bitumen, viscous, oxidized, natural aging, IR spectroscopy, thermogravimetric analysis, RTFOT, PAV.

For citation: Nebratenko, D. Yu., Prokudin, E. O., Kharpaev, A. V., Novikovskiy, A. A. & Petrov, V. A. (2026). Effect of natural and laboratory aging on microstructural composition and performance of bitumen binders. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 211-216. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.030. EDN: <https://elibrary.ru/UBOGSM>.

ВВЕДЕНИЕ

Органические вяжущие материалы играют определяющую роль в обеспечении работоспособности дорожных покрытий на всей территории Российской Федерации и одновременно являются одной из основных причин недопустимо низких сроков службы асфальтобетонных одежд даже в тех случаях, когда обеспечена требуемая капитальность дорожной одежды, надежный водоотвод и устроена трещинопрерывающая прослойка под асфальтобетонным покрытием [1].

В России на дорожных объектах различного уровня подчинения разрешены к применению несколько типов вяжущих. Но, несомненно, наибольшее распространение имеют нефтяные дорожные битумы. Применяются они в подавляющем большинстве случаев для устройства слоев дорожных одежд [2, 3]. Областью применения полимерно-битумных вяжущих являются, прежде всего, верхние слои и слои износа. Модифицированные вяжущие чаще всего находят точечное применение на особо важных и грузонапряженных объектах в южных регионах страны. Традиционные битумы существенно превосходят модифицированные и полимерно-битумные вяжущие по объемам производства и применения, при этом последние на текущий момент составляют порядка 15–20 % от общего объема вяжущих, применяемых в России.

Термопластичная природа битумов способствует достаточно быстрому накоплению в них необратимых деформаций, проявляющихся на покрытии в виде волн и колеи. Они образуются вследствие многократного воздействия знакопеременных нагрузок от колес автомобилей, что интенсифицируется в теплое время года, когда покрытие нагревается до 60 °C и выше [4, 5, 6]. При этом необходимо осознавать, что по причине того, что теплостойкость окисленных битумов не превышает 50 °C, а трещиностойкость – не ниже минус 20 °C, продольные и поперечные трещины разного генезиса появляются на асфальтобетонных покрытиях практически всегда. Природно-климатические условия в различных регионах РФ различны, но температуры наиболее холодных суток на 96 % ее территории находятся в пределах от минус 25 °C до минус 67 °C [7, 8]. Обеспечить отсутствие поверхностных трещин при условии применения в качестве вяжущего такого достаточно хрупкого материала, каковым является битум нефтяной дорожный вязкий окисленный, и при таких жестких условиях эксплуатации, как в России, практически невозможно.

Поэтому крайне важной представляется оценка возможности достоверного ускоренного лабораторного моделирования показателей вяжущих, в перспективе от нескольких месяцев до десятков лет, в сравнении с данными наблюдения указанных процессов в естественных природно-климатических условиях различных регионов

Российской Федерации.

В настоящее время в мире продолжается поиск наиболее совершенных методик, способных в лаборатории ускоренно моделировать изменения свойств битумных вяжущих материалов, которые происходят как на стадии приготовления асфальтобетонных смесей и асфальтобетона, так и в процессе эксплуатации дорожного покрытия [9]. Учитывая длительность процессов старения во время эксплуатации автомобильных дорог, были разработаны методы испытания тонкой пленки во вращающейся печи (RTFOT) для имитации кратковременного старения во время производства, транспортировки и укладки асфальтобетонных смесей, а также метод старения под действием давления и температуры (PAV), воспроизводящий долговременное старение вяжущих в условиях эксплуатации автодорог.

При высоких температурах воздуха поверхность асфальтобетонного покрытия аккумулирует тепло вследствие низкой теплопроводности его компонентов. Например, при значении температуры воздуха в диапазоне от 30 ° до 40 °C, температура дорожного покрытия способна подниматься до 60–70 °C [10]. Это демонстрирует неоднородность условий естественного старения, что приводит к существенной разнице с условиями лабораторного моделирования, поскольку стандартные протоколы PAV-старения используют постоянное воздействие 100 °C, что констатирует разницу температур на уровне 30–40 °C от фактических тепловых режимов дорожного покрытия. Необходимо также учитывать, что лабораторные методологии старения не учитывают динамические колебания температуры, присущие естественной среде из-за суточных и сезонных циклов. Еще более важно указать, этот протокол ускоренного PAV-старения фокусируется исключительно на условиях повышенной температуры и давления и вынуждено пренебрегает возможным синергетическим влиянием множества факторов окружающей среды, встречающихся во время реальной эксплуатации дорожного покрытия. Так, было обнаружено, что солнечный свет в широком диапазоне длин волн способствует ускоренному старению битума [11]. Кроме того, было показано, что под воздействием ультрафиолетового излучения происходит перестройка и разрыв химических связей компонентов битумного вяжущего, приводящих к реакциям окисления и деструкции [12, 13]. Очевидно, что, по сравнению с вариантами лабораторного моделирования процессов старения, факторы естественного старения фактически являются более сложными и многообразными. При этом важно отметить, что при разной интенсивности движения автотранспорта, экранирующего дорожную поверхность, воздействие указанных факторов оказывается весьма сложно прогнозируемым, что еще более усложнит задачу исследования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе использовались битумы

ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО И ЛАБОРАТОРНОГО СТАРЕНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРНЫЙ СОСТАВ И ПОКАЗАТЕЛИ БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ

нефтяные дорожные вязкие марки БНД 70/100, крупнотоннажно выпускаемые АО «ГАЗПРОМНЕФТЬ – МОСКОВСКИЙ НПЗ», соответствующие ГОСТ 33133-2014 (табл. 1).

Таблица 1 – Показатели битума нефтяного дорожного вязкого БНД 70/100

Table 1 – Indicators of petroleum bitumen road viscous BND 70/100

Наименование показателя	Метод испытаний	Норма по ГОСТ	Факт. значение
Глубина проникания иглы при 25 °С, 0,1 мм	ГОСТ 33136	От 71 до 100	81
Температура размягчения по кольцу и шару, °С	ГОСТ 33142	не ниже 47	49,0
Растяжимость при °С, см	ГОСТ 33138	не менее 37	3,7
Температура хрупкости, °С	ГОСТ 33143	не выше –18	–19
Температура вспышки, °С	ГОСТ 33141	не ниже 230	280
Изменение массы образца после старения, %	ГОСТ 33140	не более 0,6	0,3
Изменение температуры размягчения после старения, °С	ГОСТ 33140	не более 7	6,8

Для лабораторного моделирования старения битума были использованы стандартные методики: ГОСТ 33140-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения старения под воздействием высокой температуры и воздуха (метод RTFOT)» и ГОСТ Р 58400.5-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод старения под действием давления и температуры (PAV)».

В соответствии с вышеуказанными стандартами, битум изначально заливался в стеклянные колбы, которые затем, при температуре 163 °С, вращались в закрытой установке в течение 85 минут. Далее одновременно состаренное в тонкой плёнке вяжущее помещалось в толстостенный металлический сосуд на 20 часов при 100 °С и давлении 2,1 МПа.

Естественное старение битумов проводилось в Московской области на 55°37'41" с. ш. В качестве подложки были использованы гладкие керамические плитки (рис. 1).

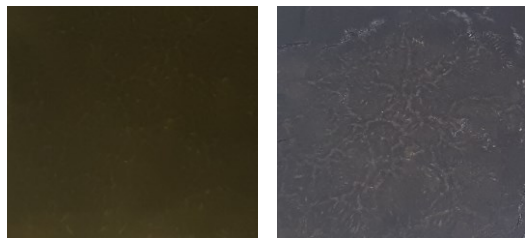


Рисунок 1 – Фотографии битумных пленок: слева – исходные, справа – после 91 дня естественного старения

Figure 1 – Photographs of bitumen films: on the left - initial, on the right - after 91 days of natural aging

Все образцы были установлены на стеллажах на высоте 5 м над уровнем земли. Толщина пленки битумных образцов составляла 3,0 мм, что соответствует толщине слоя в ходе лабораторных процедур старения. Все образцы для естественного старения

располагались горизонтально на открытом воздухе, обеспечивая непосредственное воздействие прямых солнечных лучей и достаточное расстояние от строений, деревьев и других объектов, которые могли бы создавать затемнение или локальные микроклиматические эффекты. Такое расположение гарантировало, что процесс старения, прежде всего, обусловлен региональными климатическими условиями. Исходя из варьирующейся облачности [14], температурных условий, времени восхода и захода солнца [15] и в соответствии с методикой [16] длительность эффективного солнечного дня для расчета была принята равной 12 часам [17]. Таким образом, образцы непрерывно подвергались естественному солнечному старению 91 сутки или 1092 часа [13].

В ходе последующего анализа образцов вяжущего были применены современные инструментальные методы исследований: ИК-спектроскопия, гелипроникающая хроматография, ЯМР ¹H-спектрометрия, термogravометрический анализ. Использовался ИК-спектрометр «Bruker ALPHA II», «Bruker Corporation» (USA) [18], спектры ЯМР ¹H регистрировали на спектрометре «Bruker AFR-300» в CDCl₃, химические сдвиги определяли относительно тетраметилсилана. Среднечисленная молекулярная масса (M_n), среднemasовая молекулярная масса (M_w), а также индекс полидисперсности (D) рассчитывались известным образом [19]. Теплофизические характеристики исследуемых образцов определены на приборе DSC и TGA 840e с программным обеспечением STARe «Mettler Toledo». Калибровка модуля DSC проводилась по индию и цинку [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методология ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в последние годы все чаще используется при химическом анализе структурных компонентов битумных вяжущих, позволяя точно определять химическое окружение атомов водорода в исследуемых образцах.

Методом ЯМР-спектроскопии может быть получена информация о химических сдвигах, константах спин-спинового взаимодействия и интегральные значения, которые соответствуют положениям поглощения, характеру расщепления пиков и интенсивности поглощения соответственно. Эти спектральные характеристики позволили определить положения атомов водорода вдоль углеродных цепей, тем самым определить химическую структуру анализируемого образца [21]. Атомы водорода, непосредственно связанные с ароматическими атомами углерода, обозначаются как H_A. H_α обозначает водород, присоединенный к α-атомам углерода, соседствующим с ароматическими кольцами. H_β обозначает водород на β-атомах углерода ароматических колец, а также группы CH₂ и CH вне β-положений. H_γ представляет собой водород на γ-атомах углерода ароматических колец и группах CH₃ вне γ-положений. Путем интегрирования пиков в соответствующих спектральных областях H_A, H_α, H_β и H_γ было количественно определено содержание этих четырёх типов водорода (рис. 2).

Результаты анализа спектров показали, что значения H_A и H_α после завершения длительного старения битума несколько снизились, что указывает на протекание дегидрогенизационных и конденсационных процессов на ароматических кольцах, при этом число заместителей ароматических колец уменьшается, что согласуется с ранее проведенными исследованиями [21]. После долгосрочного PAV-старения

содержание H_d и H_a в состаренном битуме, по сравнению с кратковременно состаренным вяжущим, снизилось на 11,8 % и 9,8 % соответственно, тогда как содержание H_β увеличилось на 16,4 %.

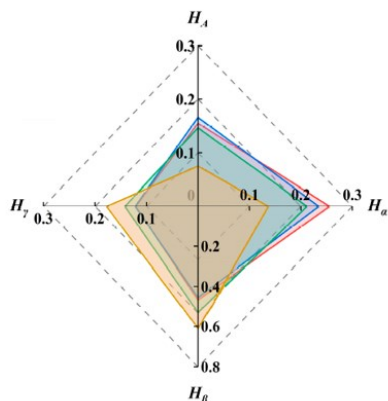


Рисунок 2 – Содержание типов атомов водорода в битумном вяжущем: красный – исходное, синий – после RTFOT, зеленый – после PAV, желтый – после естественного старения

Figure 2 – The content of hydrogen types in bitumen drying: red - initial, blue - after RTFOT, green - after PAV, yellow - after natural aging

Указанными данными проиллюстрировано, что в ходе естественного термоокислительного старения компоненты битума претерпевают заметно выраженные изменения, что существенно влияет на его макроскопические характеристики. Это в очередной раз подтверждает, что термоокислительное старение является основным фактором, приводящим к изменению химической структуры битумных вяжущих.

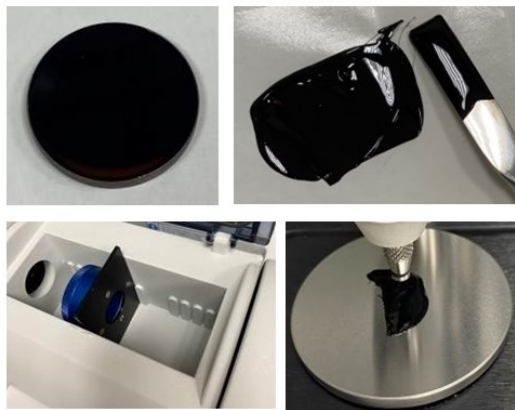


Рисунок 3 – Варианты пробоподготовки битумных образцов для исследования методом ИК-Фурье спектроскопии: верхние фото – растворный, нижние – пленочный (пояснения в тексте)

Figure 3 – Variants of sample preparation of bitumen samples for investigation by IR-Fourier spectrometry: upper photo - solution, lower - film (explanations in the text)

Для исследования изменений химической структуры применялся метод ИК-Фурье спектроскопии. Он позволил непосредственно фиксировать образование специфических химических функциональных групп, которые являются прямыми маркерами окислительного старения битума.

Для регистрации ИК-спектров образец битумного вяжущего может быть подготовлен одним из двух способов: в виде раствора битума в толуоле с последующим нанесением на окно из бромида калия или в виде тонкой пленки, наносимой на алмазную призму ИК-спектрометра (рис. 3).

ИК-спектры образцов битумного вяжущего снимались на разных стадиях лабораторного и естественного старения (рис. 4).

При анализе спектров ключевое внимание уделяется области поглощения карбонильных групп ($C=O$), которые образуются в результате реакций окисления. Аналитически это выражается в расчёте площади карбонильного пика в диапазоне частот от 1600 см^{-1} до 1820 см^{-1} [22].

Для количественной оценки процесса окисления использовался показатель роста площади карбонильного пика (CA), определяемый как разница между CA при конкретном состоянии старения и CA в эталонном состоянии, например после кратковременного старения (RTFOT). Помимо карбонильных, анализировались изменения в сульфоксидной области ($\nu \sim 1032\text{ см}^{-1}$), что даёт более полную картину химических превращений [23].

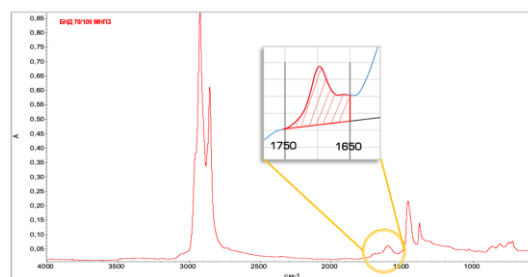


Рисунок 4 – Характерный ИК-спектр битум нефтяного дорожного вязкого окисленного БНД 70/100

Figure 4 – Typical IR spectrum of viscous oxidized petroleum road bitumen BND 70/100

В ходе расшифровки полученного ИК-спектра (рис. 4) установлено наличие характерных для битумов интенсивных полос поглощения в области 2852 и 2921 см^{-1} (валентные колебания $C-H$ в группах CH_2), свидетельствующих о значительном количестве в битуме предельных углеводородов, парафинов, масел. В области $1200\text{--}600\text{ см}^{-1}$ отмечены полосы поглощения, характерные для ароматических углеводородов, а также внеплоскостные деформационные колебания $C-H$ в области $800\text{--}650\text{ см}^{-1}$ [24].

Существенной интенсивностью отличаются полосы пропускания в выделенном на рисунке 4 диапазоне $1650\text{--}1750\text{ см}^{-1}$. Они характеризуют присутствие кислородсодержащих соединений. Так, например, это могут быть валентные колебания непредельных $C=C$ связей в основном циклического строения, и прежде всего бензольных колец. Большая полуширина и сложная структура свидетельствуют о наличии в составе битума сложных многоатомных ароматических соединений – асфальтенов. Частотный пик при 1688 см^{-1} характерен для карбонильных и карбоксильных $C=O$ групп, возникающих при окислении органических компонентов битума как на стадии его производства, так и в ходе хранения и эксплуатации [24, 25].

Битумы, являясь многокомпонентной смесью углеводородов, состоят из соединений с различной молекулярной массой, что обуславливает широкое молекулярно-массовое распределение. Кроме того, в

ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО И ЛАБОРАТОРНОГО СТАРЕНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРНЫЙ СОСТАВ И ПОКАЗАТЕЛИ БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ

ходе протекания термоокислительного старения, внешние факторы вызывают непрерывные химические реакции между этими соединениями и кислородом воздуха, что провоцирует образование в итоге относительно низкомолекулярных веществ и изменение молекулярно-массового профиля битумного вяжущего. Полученные данные гелепроникающей хроматографии битумов, подвергнутых различным типам старения, позволили проанализировать изменение молекулярных характеристик битумного вяжущего. Значения среднечисленных (M_n) и среднемассовых (M_w) молекулярных масс, а также индекс полидисперсности (D) приведены в таблице 2.

Анализ представленных в таблице 2 данных подтверждает известные зависимости изменения молекулярной массы органических веществ в ходе их окислительного старения. Переход низкомолекулярных масляных компонентов в смолы, а смол – в асфальтены проявляется в увеличении фактических значений молекулярных масс, которые достигают максимальных величин после долгосрочного лабораторного старения.

Важно отметить, что при одновременном лабораторном старении увеличение молекулярной массы битума заметно выше, чем в ходе естественного старения.

Можно отметить, что представленный в таблице 2 коэффициент полидисперсности увеличивается для битума состаренного, естественным, кратковре-

менным и долгосрочным термоокислительным старением в сравнении с исходным на 2,9 %, 9,7 % и 7,5 % соответственно. Более высокий коэффициент полидисперсности соответствует снижению содержания мальтенов, что ухудшает коллоидную стабильность битумных вяжущих [21, 23].

Таблица 2 – Параметры битума при различных режимах старения

Table 2 – Bitumen parameters under different aging conditions

Наименование показателя	CA, у.е.	M_w	M_n	D
Исходный битум БНД 70/100	1,049	1489	532	2,80
Битум после краткосрочного старения (RTFOT)	1,287	1560	542	2,88
Битум после долговременного старения (PAV)	1,461	1872	610	3,07
Битум после старения в естественных условиях	1,312	1763	586	3,01

Термогравиметрический анализ образца битума нефтяного дорожного вязкого окисленного марки БНД 70/100 показывает, что основная фаза термоокислительной деструкции находится в интервале от 220 до 350 °C и происходит в один этап [25, 26] (рис. 5).

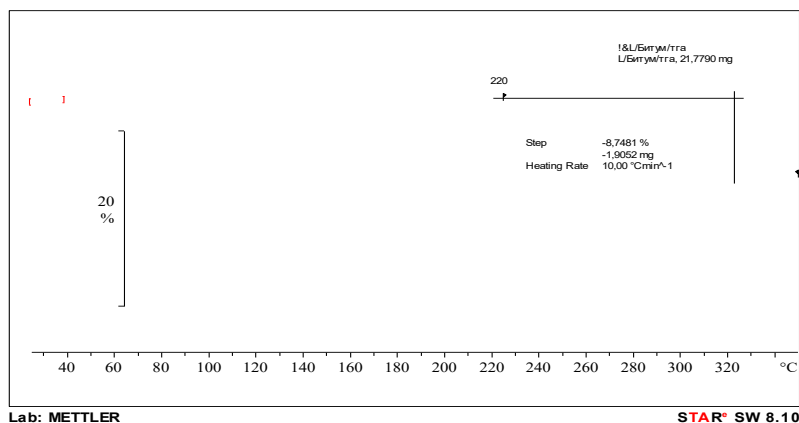


Рисунок 5 – ТГА термограмма исходного битума БНД 70/100 в среде азота
Figure 5 – TGA thermogram of used bitumen BND 70/100 in a nitrogen environment

Это свидетельствует о достаточно высокой термостабильности битума в температурном диапазоне, соответствующем нормируемому интервалу производства асфальтобетонных смесей (не выше 180–200 °C) и эксплуатации автомобильных дорог на территории России (от минус 67 до плюс 80 °C). Начало глубоких изменений химического состава с образованием новых конденсированных высокомолекулярных соединений, а также активном кислородном старении исследуемого образца (потеря массы 8,7 %) начинается после 220 °C. При последующем нагревании до температуры 450 °C образуется 16–18 % остатка, термостабильного в инертной атмосфере, что хорошо согласуется с данными ранее проведенных исследований [22]. При этом, как показывают данные многолетних наблюдений, указанные химические изменения начинают проявляться в виде ухудшений свойств покрытий только спустя значительно более продолжительные сроки эксплуатации дорог, чем период проведения данного исследования [9, 24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа полученных данных об из-

менении свойств битумов нефтяных дорожных вязких марки БНД 70/100 в ходе различных вариантов лабораторного и естественного старения установлено, что в течение первых 91 суток с момента укладки покрытия солнечная радиация провоцирует достаточные серьезные изменения химической структуры битума, вызванные термодеструкцией. Аналогичные изменения выявлены и для случаев кратковременного и долгосрочного термоокислительного старения, проведенных в лабораторных условиях.

Долгосрочное старение битума приводит к уменьшению содержания атомов водорода, непосредственно связанных с атомами углерода ароматического кольца, и атомов водорода, присоединенных к α -атомам углерода, по сравнению с кратковременно состаренным вяжущим, на 11,8 % и 9,8 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кретов В.А. [и др.]. Анализ баланса рынка битумных вяжущих с учетом сырьевых ограничений // ДОРОГИ И МОСТЫ. 2025. № 2(54). С. 9–26. DOI: 10.70991/1815-896X-2025-2-54-09-26.
2. Быстров Н.В. Методы испытаний дорожных битумов: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся

по специальности "Автомобильные дороги и аэродромы" направления транспортное строительство / Н.В. Быстров. М. : Авторская книга, 2012. 159 с. ISBN 978-5-4431-0014-2.

3. Абдуллин А.И. Битумные вяжущие : учеб. пособие / А.И. Абдуллин, Е.А. Емельянцева, Т.Ф. Ганиева, М.Р. Идрисов. Казань : КНИТУ. 2012. 99 с.

4. Александров А.С. Анализ причин колееобразования на покрытиях нежестких дорожных одежд и рекомендации по уменьшению этого явления / А.С. Александров, Т.В. Семенова, А.Л. Калинин // Вестник СибАДИ. 2019. № 6 (70). С. 718–745.

5. Поздняков М.К. Исследование сопротивляемости асфальтобетона колееобразованию // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2009. № 3. С. 16–20.

6. Mozhovi V.V. Asphalt concrete pavement working conditions on ascents and descents of highways / V.V. Mozhovi, O.V. Kushnir, L.V. Levkivska, O.M. Kutsman, I.I. Hrynychak // World science. 2024. № 3 (85). С. 1–12.

7. Печеный Б.Г. Битумы и битумные композиции / Б.Г. Печеный. М. : Химия, 1990. 256 с. : ил. ISBN 5-7245-0542-8.

8. Гохман Л.М. Особенности структуры компонентов дорожных битумов / Л.М. Гохман, Е.М. Гурарий // Химия и технология топлив и масел. 1991. № 12. С. 23–24.

9. Симчук Е.Н., Харпаев А.В., Рожков И.М. Современные подходы к моделированию старения битумных вяжущих материалов в лабораторных условиях // Дороги и мосты. 2022. № 2 (48). С. 274–306.

10. Исенбулатова Д.Х., Ефремов И.А., Лушников Н.А., Алексиков С.В., Небратенко Д.Ю. Влияние состава модифицированных и полимерно-битумных вяжущих на технические показатели щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2024. № 4 (50). С. 39–44. DOI: 10.52684/2312-3702-2024-50-4-39-44.

11. Guan M., Guo M., Liu X., Du X., Tan Y. Effect of Multifactor Coupling Aging on Rheological Properties of Asphalt Binders and Correlations between Various Rheological Indexes // Journal of Materials in Civil Engineering. 2024. Vol. 36. № 5. DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-17116.

12. Zhao Y. [et al.]. Aging characteristics and microscopic mechanisms of SBS asphalt based on coupled light-heat-water aging // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 456. P. 139190.

13. Дукий П.А. [и др.]. О влиянии УФ-излучения на реологические свойства СБС-блоксополимеров для модификации вяжущих и асфальтобетонных // Южно-Сибирский научный вестник. 2025. № 5(63). С. 45–53.

14. Центральное УГМС – Федеральное государственное бюджетное учреждение [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://cugms.ru/>.

15. Таблица восходов и заходов солнца, долгота дня в Москве [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://timewek.ru/citysun.php?vYR=2024&slD=77&MOD=1&mlD=8>.

16. Оценка климатических условий : учеб.-метод. пособие / С.Н. Смирнова. Электронные данные. Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2024. 62 с. URL: https://science.volgtech.net/editorial-publishing-center/zdaniya/uchebnye-posobiya/2024/SmirnovaSN_oku.pdf ISBN 978-5-8158-2398-3.

17. Chairperson, Publications Board World Meteorological Organization (WMO), Guide to Meteorological Instruments and methods of Observation, accessed April 29 2025. <https://www.weather.gov/media/epz/mesonet/CWOP-WMO8.pdf>.

18. Сильверштейн Р. Спектрометрическая идентификация органических соединений / Р. Сильверштейн, Ф. Вебстер, Д. Кимл ; пер. с англ. проф., д.х.н. Н.М. Сергеева и к.х.н. Б.Н. Тарасевича. Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 557 с.

19. Тугорский И.А. Химическая модификация эластомеров / И.А. Тугорский, Е.Э. Потапов, А.Г. Шварц. М. : Химия, 1993. 304 с.

20. Ситникова В.Е., Пономарева А.А., Успенская М.В.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Методы термического анализа. СПб. : ИТМО. 2021. 152 с.

21. Zhang S. [et al.]. Investigation of anti-aging mechanism of multi-dimensional nanomaterials modified asphalt by FTIR, NMR and GPC // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 305. P. 124809.

22. Li P. [et al.]. FTIR quantitative analysis method and new exploration of rheological parameters of aged asphalt // Journal of Huazhong University of Science and Technology Natural Science Edition. 2018. Vol. 46. P. 34–39.

23. Yan Y. [et al.]. Application of Infrared Spectroscopy in Prediction of Asphalt Aging Time History and Fatigue Life // Coatings. 2020. Vol. 10. P. 959. DOI: 10.3390/coatings10100959.

24. Аюпов Д.А. [и др.]. Исследование особенностей взаимодействия битумов с полимерами // Известия КазГАСУ. Казань. 2011. № 1 (15). С. 140–145.

25. Ren S. [et al.]. Chemo-physical characterization and molecular dynamics simulation of long-term aging behaviors of bitumen // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 302. P. 124437.

26. Фролов И.Н. [и др.]. Исследование битума методом дифференциальной сканирующей калориметрии: интерпретация тепловых эффектов // Нефтяная наука и технологии. 2019. № 37(4). С. 417–424. DOI: 10.1080/10916466.2018.1550499.

Информация об авторах

Д. Ю. Небратенко – к.х.н., доцент кафедры автомобильных дорог, аэродромов, основания и фундаменты, Российский университет транспорта (РУТ МИИТ), доцент кафедры химии и технологии высокомолекулярных соединений, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (РХТУ).

Е. О. Прокудин – магистрант кафедры «Дорожно-строительные материалы и химические технологии», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ).

А. В. Харпаев – руководитель лаборатории, Автономная некоммерческая организация «Научно-исследовательский институт транспортно-строительного комплекса» (АНО «НИИ ТСК»).

А. А. Новиковский – директор по технологиям, ООО «ПИДЖИ».

В. А. Петров – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой химии и технологии высокомолекулярных соединений, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (РХТУ).

Information about the authors

D.Y. Nebratenko - PhD, Associate Professor of the Department of Automobile Roads, Airfields, Foundations and Foundations, Russian University of Transport (RUT MI-IT), associate Professor of the Department of Chemistry and Technology of High-Molecular Compounds, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (RHTU).

E.O. Prokudin - Master's student of the Department of Road Construction Materials and Chemical Technologies, Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI).

A.V. Kharpaev - Head of the Laboratory, Autonomous Non-profit Organization Scientific Research Institute of Transport and Construction Complex (ANO NII TSK).

A.A. Novikovskiy - Director of Technology, PIDZHI LLC.

V.A. Petrov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemistry and Technology high-molecular compounds, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (RCTU).