

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-3-263-275>

УДК 621.644.07:665.775:620.193.91

Комплексный анализ битумно-мастичных покрытий стальных подземных распределительных газопроводов

Часть 1

Характеристика применяемых покрытий и общий механизм структурной деградации битумных материалов

Н. В. Струцкий^{1,2)}, В. Н. Романюк²⁾

¹⁾Государственное предприятие «НИИ Белгипрогаз» (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В соответствии с Концепцией Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 г. основная задача в газовой сфере – поддержание производственных фондов на уровне, обеспечивающем безопасное энергоснабжение. Основу этих производственных фондов составляют газораспределительные сети, непосредственно газопроводы. Известно, что фактором, несущим наибольшую угрозу для технического состояния стальных подземных распределительных газопроводов, является коррозия. Для компенсации глобального коррозионного фактора стальные подземные газопроводы оснащаются специальными антикоррозионными средствами, в число которых входят защитные изолирующие покрытия. Битумно-мастичные изоляционные покрытия (БМИП) – наиболее распространенные в отечественной газораспределительной системе покрытия, которые раньше других начали использоваться в производственной практике защиты от коррозии. В статье проведен комплексный анализ БМИП в части их конструкции, применяемых материалов, эволюции покрытий от битумно-минеральных к битумно-резиновым и далее к битумно-полимерным. Представлен краткий обзор развития теоретических положений о строении, физико-химических свойствах и компонентном составе битума. Показан общий механизм структурной деградации битумных материалов, характеризующийся постепенным нарастанием внутренних напряжений, повышением вязкости и хрупкости, вплоть до полного и необратимого разрушения. В зависимости от температурных условий и связанной с ними интенсивности окислительных процессов выделены автоокисление (низкотемпературное, малоинтенсивное) и термическое (высокотемпературное, интенсивное) окисление углеводородных соединений битума. Показано место автоокисления и термического окисления на предэксплуатационном (технологическом) и эксплуатационном этапах жизненного цикла битумных материалов, а также влияние температурных воздействий, полученных материалом покрытия на технологическом этапе, выражающееся в увеличении неоднородности исходного состояния покрытия до начала его эксплуатации.

Ключевые слова: стальной подземный газопровод, защита от коррозии, битумно-мастичные покрытия, битумное вяжущее, типология внутренней структуры, окисление, старение материалов

Для цитирования: Струцкий, Н. В. Комплексный анализ битумно-мастичных покрытий стальных подземных распределительных газопроводов. Часть 1: Характеристика применяемых покрытий и общий механизм структурной деградации битумных материалов / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2026. Т. 69, № 3. С. 263–275. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-3-263-275>

Адрес для переписки

Романюк Владимир Никанорович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Romaniuk Vladimir N.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Comprehensive Analysis of Bitumen-Mastic Coatings on Steel Underground Distribution Gas Pipelines

Part 1

Characteristics of the Coatings Used and the General Mechanism of Structural Degradation of Bitumen Materials

N. V. Strutsky^{1, 2)}, V. N. Romaniuk²⁾

¹⁾State Enterprise Research Institute Belgiprotopgaz (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. In accordance with the Concept of the National Strategy for Sustainable Development of the Republic of Belarus for the period up to 2035, the main objective in the gas sector is to maintain production assets at a level that ensures safe energy supply. The basis of these production assets are gas distribution networks, directly gas pipelines. It is known that the factor that poses the greatest threat to the technical condition of steel underground gas distribution pipelines is corrosion. To compensate for the global corrosion factor, steel underground gas pipelines are equipped with special anticorrosive agents, including protective insulating coatings. Bitumen-mastic insulating coatings (BMIC) are the most common coatings in the domestic gas distribution system, which were used earlier than others in industrial practice for corrosion protection. The article provides a comprehensive analysis of BMIC in terms of their design, materials used, and the evolution of coatings from bitumen-mineral to bitumen-rubber and further to bitumen-polymer. A brief overview of the development of theoretical provisions on the structure, physico-chemical properties and component composition of bitumen is presented. The general mechanism of structural degradation of bituminous materials is shown, characterized by a gradual increase in internal stresses, increased viscosity, and brittleness, leading to complete and irreversible destruction. Depending on the temperature conditions and the associated intensity of oxidative processes, autooxidation (low-temperature, low-intensity) and thermal (high-temperature, intensive) oxidation of bitumen hydrocarbon compounds are distinguished. The place of autooxidation and thermal oxidation at the pre-operational (technological) and operational stages of the life cycle of bitumen materials is shown, as well as the influence of temperature effects on the coating material at the technological stage, manifested in an increase in the heterogeneity of the initial state of the coating before its operation.

Keywords: steel underground gas pipeline, corrosion protection, bitumen-mastic coatings, bitumen binder, internal structure typology, oxidation, material aging.

For citation: Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2026) Comprehensive Analysis of Bitumen-Mastic Coatings on Steel Underground Distribution Gas Pipelines. Part 1: Characteristics of the Coatings Used and the General Mechanism of Structural Degradation of Bitumen Materials. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (3), 263–275 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-3-263-275>

Введение

Коррозия представляет опасность повреждения и разгерметизации трубопроводов, образования утечек транспортируемой среды, создает риски возникновения аварийных ситуаций. Являясь основным защитным элементом стального подземного трубопровода, антикоррозийное изоляционное покрытие оказывает непосредственное влияние на его надежность и долговечность [1, 2].

Битумно-мастичные изоляционные покрытия (БМИП) – один из наиболее распространенных видов наружной изоляции стальных подземных трубопроводов, в том числе газопроводов. На территории Беларуси битумно-мастичная изоляция применялась при строительстве объектов газораспределительной системы с начала газификации (1958 г.) и по 2003 г. До настоящего времени данные покрытия остаются преобладающими

в газовом хозяйстве республики, ими защищено около 87 % от общей протяженности газораспределительной сети.

Такое покрытие отличается хорошими гидрофобными и адгезионными качествами, недорогой стоимостью и доступностью материалов, несложной в освоении (хотя и достаточно трудоемкой) технологией нанесения, что обусловило ее широкое распространение и продолжительный период использования.

Вместе с тем выводы о долговечности и эксплуатационной стойкости данного вида изоляционных покрытий до сих пор остаются неоднозначными и противоречивыми. Несмотря на ряд опубликованных в последнее время исследований, посвященных изучению конкретно БМИП подземных газопроводов [3–6], в настоящее время отсутствуют детальная характеристика указанных покрытий, учитывающая длительную эволюцию применяемых для их изготовления материалов, а также цельное представление о механизме деградации БМИП в контексте общей теории строения и структурных типов битумных материалов.

В условиях постепенного старения эксплуатируемых БМИП и с учетом их массовости эти вопросы требуют своего раскрытия в контексте решения задачи общей оценки остаточного ресурса данного вида покрытий, обеспечения своевременного и научно обоснованного планирования мероприятий по ремонту (реконструкции, замене) объектов газораспределительной системы республики.

Основная часть

Характеристика БМИП. Традиционная антикоррозийная битумно-мастичная изоляция подземных трубопроводов представляет собой многослойное покрытие горячего нанесения, обладающее сложной конструкцией. Как правило, битумно-мастичная изоляция распределительных газопроводов состоит из грунтовочного слоя, трех слоев битумной мастики, двух армирующих слоев (стеклохолст марок ВВ-К и ВВ-Г), обертки (крафт-бумага, бризол, пленка ПЭКОМ). Общая толщина покрытия составляет 7,5–9,0 мм. Конструкция трехслойного БМИП показана на рис. 1. Некоторое количество газопроводов, запроектированных до вступления в силу [7], получили одно- и двухслойную конструкцию покрытия в зависимости от коррозионной агрессивности грунтов.

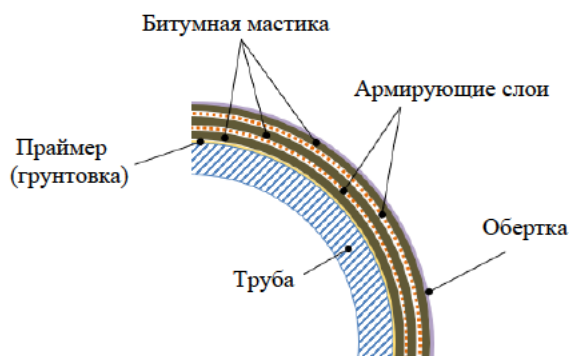


Рис. 1. Конструкция трехслойного битумно-мастичного изоляционного покрытия

Fig. 1. Design of a three-layer bitumen-mastic coating

Армирующие слои и обертка несут вспомогательные функции – механическое упрочение покрытия, повышение адгезии между слоями мастики (армирующие слои) и защиту битумной мастики от внешних воздействий, в первую очередь от ультрафиолета и влаги, при хранении изолированных труб и выполнении строительно-монтажных работ (обертка).

Изолирующую функцию покрытия (создание разделяющего барьера между наружной поверхностью трубы и грунтовым электролитом) обеспечивает битумная мастика – композитный материал на основе битумного вяжущего, дополненного различными модифицирующими добавками с целью улучшения заданных характеристик (прочности, эластичности, термостабильности и т. д.).

На первоначальном этапе использовались битумно-минеральные мастики (МБМ), наполнителем в которых служил преимущественно каолин. Такие покрытия носили название битумных эмалей. В дальнейшем состав битумно-минеральных мастик становился разнообразнее, вместо каолина стали использовать доломит, доломитизированные и асфальтовые известняки, тальк, хризотилловый асбест, в состав при необходимости стали вводиться пластификаторы: масло зеленое, масло осевое, масло автотракторное, полидиен и другие, что позволило производить трубоизоляционные работы при пониженных температурах наружного воздуха [8, 9].

В 1970-е гг. появился принципиально новый материал, имеющий более высокие технические свойства по сравнению с МБМ, – мастика битумно-резиновая (МБР), в которой для модификации свойств битума была использована резиновая крошка, полученная при переработке изношенных автомобильных шин. Добавление резиновой крошки позволило существенно улучшить трещиностойкость и деформативность материала.

С развитием полимерных материалов последние также стали использоваться для улучшения структурно-механических свойств битумных мастик. Применение полимеров позволило достичь значительного изменения свойств битумов: увеличения вязкости, снижения термочувствительности, расширения рабочего температурного интервала и т. д.

Таким образом, по мере развития технологий модификации битумов и получения битумных композитов с заданными свойствами разнообразие битумных мастик, используемых для изоляции стальных подземных газопроводов, возрастало [10].

Состав и строение битума. С учетом того, что битумное связующее является преобладающим компонентом мастики (75–95 % от общей объема), во многом определяющим ее свойства и поведение, понимание причин изменения свойств БМИП в процессе эксплуатации требует обращения к фундаментальным представлениям о строении битума и механизмах его старения.

Битум – твердое или вязкотекучее органическое вещество от темно-коричневого до черного цвета, нерастворимое в воде, полностью или частично растворимое в органических растворителях. Битумы относятся к термопластичным материалам, обладают аморфным строением и не имеют определенной температуры плавления. Соответственно переход от твердого состояния к жидкому происходит в широком интервале температур и характеризуется температурой размягчения [11, 12].

Битум обладает ценными электро- и гидроизоляционными свойствами: малой водопроницаемостью, низкой электропроводностью, высокой хими-

ческой стойкостью. В защитных антикоррозионных покрытиях стальных подземных трубопроводов используются нефтяные, то есть полученные путем переработки нефти, битумы (в основном битумы нефтяные изоляционные и битумы нефтяные строительные).

Из-за сложности химического состава битума осуществить его полный анализ на практике невозможно, однако даже при наличии такой информации сам по себе химический состав не дает возможности судить о свойствах материала. В этой связи битумы принято характеризовать по их групповому химическому составу (ГХС), то есть по количественному содержанию определенных групп химических соединений, объединенных по близости своего строения и свойств [13, 14].

Традиционно в битумах выделяют три основные группы углеводородов – масла, смолы и асфальтены. Масла являются наиболее легкой частью битума. В группу масел входят парафинонафтеновые и ароматические соединения, растворяющиеся в легком бензине. Это жидкие маловязкие вещества светло-желтого цвета, придающие битумам пластичность и текучесть [11] и способствующие уменьшению вязкости.

Смолы – более сложные и высокомолекулярные по сравнению с маслами соединения полициклической структуры, растворимые в бензоле, хлороформе, эфире. Представляют собой полутвердые (вязкопластичные) вещества красновато-бурового цвета. Смолы придают битумам клеящие (вязущие) и адгезионные свойства, эластичность и растяжимость [11, 15, 16]. Смолы играют ключевую роль в поддержании водоустойчивости битума.

Асфальтены рассматриваются как продукт уплотнения смол, это наиболее высокомолекулярные полярные компоненты битума. Их основу составляют надмолекулярные ассоциированные комплексы (пачки) из 5–6 двухмерных дискообразных пластинчатых слоев полициклических ароматических систем. В состав асфальтенов входят азот-, кислород- и серосодержащие соединения, металлоорганические компоненты, порфирины [17].

Асфальтены представляют собой твердые неплавкие вещества черного цвета, нерастворимые в низкомолекулярных парафиновых углеводородах нормального строения (C_5 – C_7), растворимые в хлороформе и сероуглероде. Асфальтены придают битумам жесткость, повышают вязкость, твердость, теплоустойчивость, когезионные свойства материала [16].

Сводная характеристика основных компонентов битума представлена в табл. 1

Таблица 1

Характеристика основных компонентов битума

Characteristics of the main bitumen components

Компонент	Молекулярная масса М, г/моль	Плотность, г/см ³	Состояние	Влияние на физико-механические свойства
Масла	От 300 до 800	<1	Жидкое	Придают подвижность, текучесть, пластичность
Смолы	От 600 до 1000	≈1	Вязкое, полутвердое	Придают эластичность, растяжимость (дуктильность), водоустойчивость, адгезию
Асфальтены	500–2000	>1	Твердое	Придают вязкость, твердость, температурную устойчивость, когезионную прочность

Также часто используется деление битума на асфальтены и мальтены, представляющие собой сумму масел и смол. В настоящее время широкое применение для определения группового состава нефтепродуктов и, в частности, битумов находит так называемый SARA-анализ, который предполагает разделение битума на четыре группы по растворимости и полярности:

- насыщенные углеводороды (Saturates);
- ароматические углеводороды (Aromatics);
- смолы (Resins);
- асфальтены (Asphaltenes).

Классическая схема SARA-анализа представлена на рис. 2.

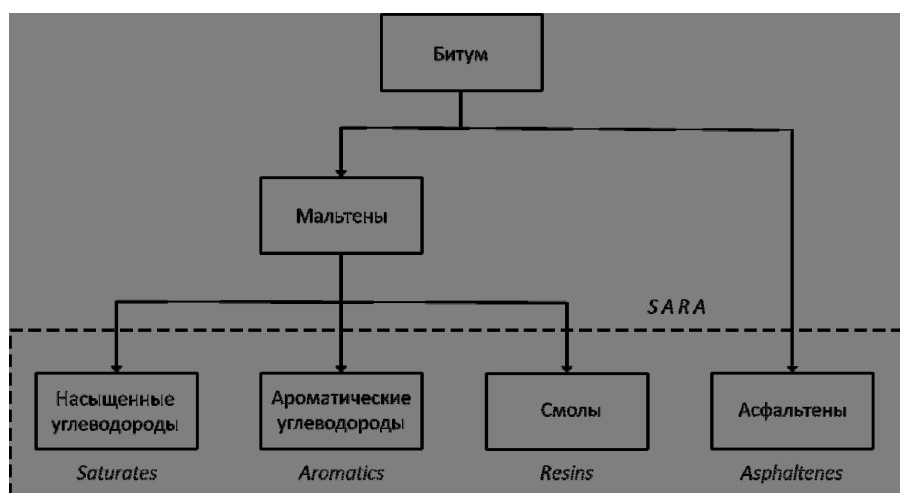


Рис. 2. Схема SARA-анализа

Fig. 2. The SARA analysis scheme

Также, несмотря на относительно низкое доленое содержание, большое влияние на структурно-механические качества битума могут оказывать такие его составляющие, как парафины, карбены и карбоиды. Эти соединения нарушают однородность битума, значительно повышая его хрупкость.

Отмеченные выше компоненты находятся в тесной взаимосвязи, играя различные роли в общей структуре материала. Ранние представления о строении нефтяных битумов сформировались в 1920-е гг. на основе коллоидно-мицеллярной модели Нелленштейна, согласно которой битум представляет собой дисперсную систему из суспендированных в масляной среде мицелл, состоящих из стабилизированных смолами асфальтенов.

Представление о битуме как дисперсной системе позволило классифицировать типичные структуры битума по кинетическим свойствам дисперсной фазы. В 40–50-е гг. XX в. немецкие ученые Пфайффер (Pfeiffer) и Саал (Saal) выделили три структурных типа битума по аналогии со свобододисперсным, переходным и связнодисперсным классами дисперсных систем: золь (sol), золь-гель (sol-gel) и гель (gel), что позволило удовлетворительно объяснить реологическое поведение битумов различного типа.

В СССР аналогичная классификация для битумов отечественного производства разработана в [18]. В 1973 г. обобщены данные по групповому составу битумов и введены количественные критерии для трех структур-

ных типов (табл. 2). Эта классификация учитывала специфику нефтей Советского Союза и климатические факторы эксплуатации битумных материалов.

Таблица 2

Структурные типы битумов по А. С. Колбановской
Structural types of bitumen's according to A. S. Kolbanovskaya

Тип	Содержание компонентов, %		
	Масла	Смолы	Асфальтены
I	>50	<24	>25
II	<48	>36	<18
III	45–49	30–34	21–23

Структура I типа (гель) представляет собой пространственную коагуляционную сетку-каркас из асфальтенов, диспергированных в слабо структурированной смолами дисперсионной среде из смеси парафинафтеновых и ароматических углеводородов. Асфальтены взаимодействуют между собой через тонкие прослойки дисперсионной среды; смолы, адсорбирующиеся на внешней лиофильной поверхности асфальтенов, обладают в тонком пленочном слое повышенными механическими свойствами. Битумы I типа демонстрируют высокую механическую прочность, хорошую теплоустойчивость и деформативную способность, однако имеют сравнительно малую устойчивость к старению.

Структура II типа (золь) представляет собой предельно стабилизированную разбавленную суспензию из асфальтенов в сильно структурированной смолами дисперсионной среде, коагуляционный каркас отсутствует [18]. Эти битумы характеризуются высокой пластичностью, растяжимостью и хорошей устойчивостью к старению [19], но меньшей по сравнению с битумами I типа прочностью.

Структура III типа (золь-гель) является промежуточной. Количество асфальтенов позволяет им взаимодействовать в локальных объемах системы, но еще недостаточно для создания сплошного структурного каркаса. Соответственно отдельные образования (агрегаты) асфальтенов находятся в дисперсионной среде, структурированной смолами в большей степени, чем в битумах I типа, но в меньшей, чем в битумах II типа. Свойства таких битумов также носят промежуточный характер: механическая прочность выше, чем у битумов II типа, но ниже, чем у битумов I типа, устойчивость к процессам старения, наоборот, лучше по сравнению с битумами I структурного типа, но хуже, чем у битумов II типа [18].

Изложенная выше классификация является общепринятой, и позволяет успешно предсказывать поведение битума в реальных условиях эксплуатации по его типу, что весьма важно с практической точки зрения.

Коллоидно-химические представления получили дальнейшее развитие в рамках теории нефтяных дисперсных систем (НДС) [20]. Согласно положениям данной теории, базовым объектом структуры битума является сложная структурная единица (ССЕ) – надмолекулярный смолисто-асфальтеновый комплекс, включающий в себя:

– ядро из асфальтенов или асфальтеновых ассоциатов с максимальным потенциалом межмолекулярного взаимодействия;

– сольватную оболочку – слой менее полярных смол и высокоароматизированных углеводородов;

– переходную зону и дисперсионную среду – парафино-нафтеновые и ароматические углеводороды, спиртобензольные смолы и другие компоненты.

ССЕ понимается как базовая частица коллоидной дисперсности, способная существовать самостоятельно и обладающая достаточной избыточной энергией для формирования границы раздела фаз. Принципиальное строение ССЕ показано на рис. 3.

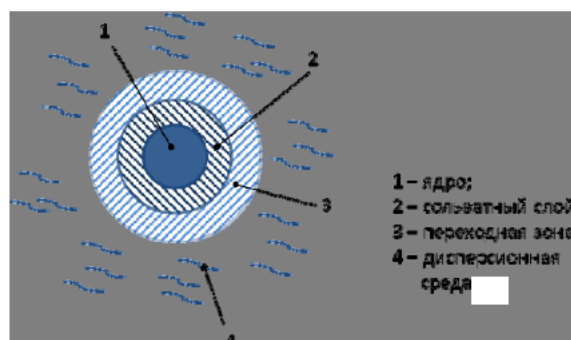


Рис. 3. Строение сложной структурной единицы нефтяных дисперсных систем

Fig. 3. The structure of a complex structural unit of petroleum dispersed systems

Размеры и состав ядра и сольватной оболочки зависят как от внутренних факторов, так и внешних воздействий. ССЕ могут быть первичными, образовавшимися в результате адсорбции, и вторичными, образовавшимися в результате слияния первичных ССЕ, что приводит к широкому распределению частиц по размерам и морфологии [20, 21].

В настоящее время понятие нефтяной дисперсной системы применяется в качестве фундаментальной основы для описания свойств и поведения битумных материалов. В рамках данной теории битум можно определить как специфическую полидисперсную НДС, характеризующуюся соотношением таких параметров как количество, состав и размер надмолекулярных образований, толщина сольватной оболочки [21].

Общий механизм старения битума. Применительно к битумным вяжущим, основной механизм возрастной деградации заключается в изменении компонентного соотношения масел, смол и асфальтенов в сторону увеличения доли асфальтенов (последовательное превращение масел → смол → асфальтенов под действием кислорода, температуры, влажности, УФ-излучения и т. д.). При этом процесс превращения масел в смолы идет медленнее, чем процесс преобразования смол в асфальтены [22].

Наряду с протекающими химическими процессами происходит физическая потеря легких (летучих) фракций битума в окружающую среду и вследствие адсорбции наполнителем (при использовании в составе битумных композитов высокопористых минеральных добавок), что также оказывает определенное влияние на характер и интенсивность старения материала.

С изменением компонентного баланса битума происходит его структурная перестройка. Согласно А.С. Колбановской, старение битума заклю-

чается в его последовательном переходе от структуры «золь» в структуру «гель», а затем к разрушению. Указанная последовательность обусловлена динамикой агрегации асфальтенов, их балансом с дисперсионной средой, и может быть разделена на три стадии [18].

На первой стадии происходит реорганизация смол и формирование начальной коагуляционной сетки асфальтенов. Это приводит к оптимизации структурно-реологических характеристик битума: повышается эластичность, вязкость и когезия. Вторая стадия характеризуется дальнейшим развитием жесткой пространственной структурной сетки асфальтенов и вторичных асфальтовых образований, концентрация которых продолжает расти, усиливая межагрегатные взаимодействия. В результате битум приобретает выраженную тиксотропию и повышенную жесткость.

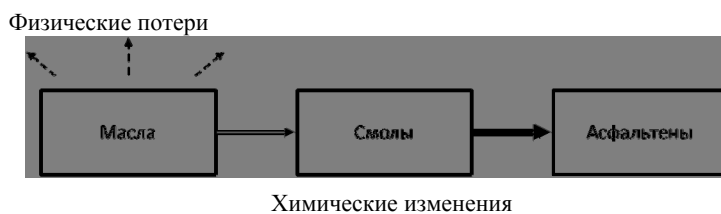


Рис. 4. Общий механизм старения битумов

Fig. 4. General mechanism of bitumen aging

Третья стадия представляет собой кульминацию процесса старения, выражающуюся в разрушении пространственной структуры битума. Дальнейшее накопление асфальтенов и убывание мальтеновой части приводит к дефициту дисперсионной среды, агрегативная устойчивость системы резко снижается. В отдельных узлах коагуляционной сетки обнажаются зоны прямого контакта асфальтовых частиц, которые начинают терять сольватные оболочки и агрегироваться в более крупные структуры, что вызывает локальные высокие внутренние напряжения, потерю битумом пластических свойств и нарастание хрупкости. Далее следует прогрессивное снижение когезии, вплоть до ее нулевого значения при полном разупрочнении структуры материала [18].

Такая трансформация внутренней структуры в процессе эксплуатации происходит одинаково для битумов всех структурных типов, но через различное время (проще говоря, при прочих равных условиях, чем ближе битум к структуре «золь», тем он устойчивее к старению).

В рамках SARA-анализа связь группового состава битумов с их внутренней структурой учитывает индекс коллоидной нестабильности, или индекс Гастеля (Colloidal Instability Index, Gaestel Index), определяемый по выражению

$$I_c = \frac{Acф + ПНС}{AC + Cm},$$

где Acф – асфальтены; ПНС – парафинонафтоновые соединения; AC – ароматические соединения; Cm – смолы.

С увеличением содержания асфальтенов и насыщенных углеводородов устойчивость системы снижается, а индекс I_c растет, значения $I_c > 0,55$ показывают, что коллоидная структура битума нестабильна [19].

В старении битумов, как и других высокомолекулярных веществ, доминируют окислительные процессы. Основой для понимания процессов окисления углеводородов служат теория медленного окисления органических соединений (перекисная теория) [23] и теория цепных реакций [24].

Ключевое положение [24] заключается в том, что один первичный радикал может запускать длинную последовательность элементарных реакций, во время которой образуются высокоактивные интермедиаты. При определенных условиях цепь может разветвляться, что приводит к лавинообразному ускорению реакции. Таким образом, окисление углеводородов протекает по радикально-цепному механизму.

Окисление битума включает несколько параллельных реакций, в том числе реакции оксиполимеризации, полиоксиконденсации и окислительной деструкции, в ходе которых образуются высокомолекулярные соединения с выделением низкомолекулярных побочных продуктов. Окислительные процессы проявляются в тесной взаимосвязи с температурой, ускоряющей окисление битума экспоненциально (по Аррениусу), обеспечивая энергию активации для образования свободных радикалов, повышая диффузию O_2 и скорость распада гидропероксидов.

В зависимости от температурных условий можно выделить автоокисление и термическое окисление битумных углеводородов. Термическое окисление преобладает при температуре 150–200 °С и выше и характерно для так называемой «технологической» или «доэксплуатационной» стадии, включающей этапы изготовления битума и затем композитных материалов на его основе, проведения горячих изоляционных работ (короткие промежутки времени, но высокая интенсивность окислительного процесса). Автоокисление протекает при низких температурах (ниже 40 °С) и характерно для стадии эксплуатации материала (длительный временной срок при малой интенсивности окислительного процесса) [25].

Специфический механизм и отличительные особенности старения БМИП стальных подземных газопроводов на стадии эксплуатации рассмотрим во второй части.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что битумно-мастичные изоляционные покрытия представляют собой семейство родственных изоляционных покрытий горячего нанесения на основе битумных вяжущих, модифицированных добавками различной природы, состава и характера взаимодействия с битумной матрицей. Это позволяет сделать вывод, что различные битумно-мастичные изоляционные покрытия при общем сходном механизме старения в ходе эксплуатации могут демонстрировать отличия в динамике и протекании деградационных процессов (иметь свой «профиль старения»).

2. Раскрыт общий механизм деградации битумных материалов, заключающийся в поступательном изменении под влиянием окислительных процессов их компонентного состава (увеличении содержания асфальтенов, снижении содержания масел и особенно смол) и соответствующей пере-

стройки внутренней структуры в сторону жесткой напряженной пространственной сетки асфальтовых частиц и агрегатов, с нарастанием вязкости, хрупкости и итоговым разрушением системы.

3. В зависимости от температурных условий окисления битумных углеводородов выделены автоокисление (малоинтенсивный процесс, температуры ниже 40 °С) и термическое окисление (высокоинтенсивный процесс, температуры 150–200 °С и выше), показано их место в жизненном цикле БМИП.

4. Показано, что с учетом особенностей изготовления и нанесения битумно-мастичные изоляционные покрытия подвергаются воздействию высоких температур уже на предэксплуатационном этапе, что может приводить к дополнительной неоднородности начального состояния покрытия и, как следствие, значительному разбросу в показателях достигнутой долговечности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Струцкий, Н. В. Организация электрохимической защиты стальных подземных трубопроводов от коррозии в газораспределительной отрасли Республики Беларусь / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 3. С. 257–267. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-257-267>
2. Струцкий, Н. В. Некоторые вопросы обеспечения полноты и достоверности эксплуатационных данных, получаемых в ходе приборного обследования стальных подземных газопроводов / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // Наука и техника. 2024. Т. 23, № 1. С. 58–66. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-58-66>
3. Исследование ресурса эксплуатации защитных мастичных покрытий подземных газопроводов по энергии активации термоокислительной деструкции / Н. Р. Прокопчук, В. А. Седнин, А. А. Абразовский [и др.] // Энергетическая стратегия. 2024. № 4 (100). С. 58–62.
4. Оценка ресурса эксплуатации мастичных защитных покрытий подземных газопроводов по результатам измерения переходного электрического сопротивления / В. А. Седнин, А. А. Абразовский, Н. В. Струцкий, С. Ф. Гориченко // Энергетическая стратегия. 2024. № 5 (101). С. 48–51.
5. Прокопчук, Н. Р. Новый подход к оценке долговечности изоляционных битумных покрытий стальных газопроводов подземного залегания / Н. Р. Прокопчук, Л. А. Ленартович, А. Т. Рудковский // Нефтегазохимия-2025: материалы VIII Междунар. науч.-техн. форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке. Минск: БГТУ, 2025. С. 212–214.
6. Струцкий, Н. В. Анализ сохранения целостности битумно-мастичной изоляции распределительных газопроводов в процессе эксплуатации / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // Инновации в образовательном процессе: сб. трудов XXI Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 160-летию со дня рождения академика А. Н. Крылова. Чебоксары: Политех, 2023. С. 140–144.
7. Единая система защиты от коррозии и старения. Подземные сооружения. Общие технические требования: ГОСТ 9.015–74. Введ. 01.01.1975. М.: Изд-во стандартов, 1974. 86 с.
8. Защита подземных металлических сооружений от коррозии: справ. / под ред. Н. И. Рябцева. М.: Изд-во М-ва коммун. хозяйства РСФСР, 1959. 743 с.
9. Кулаков, Н. Г. Справочник по газоснабжению / Н. Г. Кулаков, И. А. Бережнов. Киев: Будивельник, 1968. 320 с.
10. Струцкий, Н. В. Эволюция битумно-мастичных защитных покрытий стальных подземных распределительных газопроводов / Н. В. Струцкий // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электрон. сб. ст. VII Междунар. науч. конф. Новополоцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2026. С. 167–171. URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/49779?mode=full> (дата обращения 12.04.2026).

11. Колесникова, Л. Г. Органические вяжущие вещества и материалы на основе битумов: учеб. пособие для вузов / Л. Г. Колесникова, М. В. Мокрова, Т. А. Иванова. Казань: Бук, 2022. 78 с.
12. Косарева, М. А. Основные технологии переработки нефтегазового сырья: учеб. пособие / М. А. Косарева, С. Г. Стахеев, Н. А. Третьякова. Екатеринбург: Изд-во Урал. унта, 2022. 110 с.
13. Битумные вяжущие: учеб. пособие / А. И. Абдуллин, Е. А. Емельянычева, Т. Ф. Ганиева, М. Р. Идрисов. Казань: Изд-во КНИТУ, 2012. 100 с.
14. Тарамов, Ю. Х. Влияние состава битума на эксплуатационные свойства / Ю. Х. Тарамов, П. С. Цамаева, А. А. Эльмурзаев // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2022. Т. XVIII, № 1 (27). С. 54–62.
15. Руденская, И. М. Нефтяные битумы / И. М. Руденская. М.: Высш. шк., 1964. 43 с.
16. Гун, Р. Б. Нефтяные битумы / Р. Б. Гун. М.: Химия, 1973. 432 с.
17. Галимова, Г. А. Состав, свойства, структура и фракции асфальтенов нефтяных дисперсных систем / Г. А. Галимова // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Том 18, № 20. С. 60–64.
18. Колбановская, А. С. Дорожные битумы / А. С. Колбановская, В. В. Михайлов. М.: Транспорт, 1973. 261 с.
19. Пыриг Я. И. Методы оценки качества дорожных битумов: возникновение, развитие и современные возможности использования: учеб. пособие / Я. И. Пыриг, В. А. Золотарев. Харьков: Форт, 2013. 64 с.
20. Майданова, Н. В. Структурообразование компонентов нефтяных битумов / Н. В. Майданова // Автомобильные дороги. 2015. № 1. С. 81–86.
21. Производство нефтяных битумов / А. А. Гуреев, Е. А. Чернышева, А. А. Коновалов, Ю. В. Кожевникова. М.: Нефть и газ, 2007. 102 с.
22. Ковалев, Я. Н. Дорожно-строительные материалы и изделия: учеб.-метод. пособие / Я. Н. Ковалев, С. Е. Кравченко, В. К. Шумчик. Минск: Новое знание, 2013. 630 с.
23. Бах, А. Н. О роли перекисей в процессах медленного окисления / А. Н. Бах // Журнал русского физико-химического общества. 1897. Вып. 6, № 29. С. 373–398.
24. Семенов, Н. Н. О некоторых проблемах химической кинетики / Н. Н. Семенов. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 686 с.
25. Изменения битума при автоокислении и термоокислительном воздействии, стабилизация свойств / В. П. Киселев, А. А. Ефремов, Н. Г. Максимов [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Строительство. 2021. № 8. С. 13–24.

Поступила 01.12.2025 Подписана в печать 10.02.2026 Опубликована онлайн 29.05.2026

REFERENCES

1. Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2024) Organization of Electrochemical Protection of Steel Underground Pipelines Against Corrosion in the Gas Distribution Industry of the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (3), 257–267 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-257-267>.
2. Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2024) Some Issues of Ensuring Completeness and Reliability of Operational Data Obtained. *Nauka i tehnika = Science and Technology*, 23 (1), 58–66 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-58-66>.
3. Prokopchuk N. R., Sednin V. A., Abrazovsky A. A., Strutsky N. V., Gorichenko S. F. (2024) Study of the Service Life of Protective Mastic Coatings of Underground Gas Pipelines Based on the Activation Energy of Thermo-Oxidative Destruction. *Energeticheskaya strategiya = Energy Strategy*, 100 (4), 58–62 (in Russian).
4. Sednin V. A., Abrazovskiy A. A., Strutskiy N. V., Gorichenko S. F. Assessment of the Service Life of Mastic Protective Coatings of Underground Gas Pipelines Based on Transition Electrical Resistance Measurements. *Energeticheskaya strategiya = Energy Strategy*, 101 (5). 48–51 (in Russian).
5. Prokopchuk N. R., Lenartovich L. A., Rudkovsky A. T. (2025) A New Approach to Assessing the Durability of Bitumen Insulation Coatings of Steel Underground Gas Pipelines. *Neftgazokhimiya – 2025: materialy VIII Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo foruma po khimicheskim tekhnologiyam i neftegazopererabotke* [Oil and Gas Chemistry – 2025: Proceedings

- of the VIII International Scientific and Technical Forum on Chemical Technologies and Oil and Gas Processing]. Minsk, BSTU, 212–214 (in Russian).
6. Strutsky N. V., Romanyuk V. N. (2023) Analysis of the Integrity Preservation of Bitumen-Mastic Insulation of Distribution Gas Pipelines During Operation. *Innovatsii v obrazovatel'nom protsesse: sbornik trudov XXI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchenoy 160-letiyu so dnya rozhdeniya akademika A. N. Krylova* [Innovations in the Educational Process: Collection of Works of the XXI International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 160th Anniversary of the Birth of Academician A. N. Krylov]. Cheboksary, Politekh Publ., 140–144 (in Russian).
 7. State Standard 9.015–74. *Unified System of Corrosion and Aging Protection. Underground Structures. General Technical Requirements*. Moscow, Publishing standards, 1974. 86 (in Russian).
 8. Ryabtsev N. I. (ed.) (1959) *Protection of Underground Metal Structures from Corrosion*. Moscow, Ministry of Communal Economy of the RSFSR Publ. 743 (in Russian).
 9. Kulakov N. G., Berezhnoy I. A. (1968) *Gas Supply: Reference Textbook*. Kiev, Budivelnyk Publ. 320 (in Russian).
 10. Strutsky N. V. (2026) Evolution of Bitumen-Mastic Protective Coatings of Steel Underground Distribution Gas Pipelines. *Arkhitekturno-stroitel'nyy kompleks: problemy, perspektivy, innovatsii: elektron. sb. st. VII mezhdunar. nauch. konf.* [Architectural and Construction Complex: Problems, Prospects, Innovations: Electronic Collection of Articles of the VII International Scientific Conference]. Novopolotsk, Polotsk State University named after Euphrosyne of Polotsk Publ., 167–171. Available at: <https://elib.psu.by/handle/123456789/49779?mode=full> (accessed 12 April 2026) (in Russian).
 11. Kolesnikova L. G., Mokrova M. V., Ivanova T. A. (2022) *Organic Binder Substances and Bitumen-Based Materials*. Kazan, Buk Publ. 78 (in Russian).
 12. Kosareva M. A., Stakheev S. G., Tretyakova N. A. (2022) *Main Technologies for Processing Oil and Gas Raw Materials*. Ekaterinburg, Ural University Publ. 110 (in Russian).
 13. Abdullin A. I., Emel'yanycheva E. A., Ganieva T. F., Idrisov M. R. (2012) *Bitumen Binders*. Kazan, KNITU Publ. 100 (in Russian).
 14. Tarimov Yu. Kh., Tsamaeva P. S., Elmurzaev A. A. (2022) Influence of Bitumen Composition on Performance Properties. *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskkiye nauki = Herald of GSTOU. Engineering Sciences*, XVIII (27), 54–62 (in Russian).
 15. Rudenskaya I. M. (1964) *Petroleum Bitumens*. Moscow, Vysshaya shkola Publ. 43 (in Russian).
 16. Gun R. B. (1973) *Petroleum Bitumens*. Moscow, Khimiya Publ. 432 (in Russian).
 17. Galimova G. A. (2015) Composition, Properties, Structure and Fractions of Petroleum Asphaltenes in Disperse Systems. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Herald of Technological University*, 18 (20), 60–64 (in Russian).
 18. Kolbanovskaya A. S., Mikhailov V. V. (1973) *Road Bitumens*. Moscow, Transport Publ. 261 (in Russian).
 19. Pyrig Ya. I., Zolotarev V. A. (2013) *Methods for Evaluating Road Bitumen Quality: Origin, Development and Modern Application Possibilities*. Kharkov, Fort Publ. 64 (in Russian).
 20. Maydanova N. V. (2015) Structure Formation of Petroleum Bitumen Components. *Avtomobil'nye dorogi* [Automobile Roads], (1), 81–86 (in Russian).
 21. Gureev A. A., Chernysheva Ye. A., Konovalov A. A., Kozhevnikova Yu. V. (2007) *Production of Petroleum Bitumens*. Moscow, Neft' i gaz Publ. 102 (in Russian).
 22. Kovalev Ya. N., Kravchenko S. Ye., Shumchik V. K. (2013) *Road Construction Materials and Products*. Minsk, Novoe znanie Publ. 630 (in Russian).
 23. Bakh A. N. (1897) On the Role of Peroxides in Slow Oxidation Processes. *Zhurnal Russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva = Journal of the Russian Physical-Chemical Society*, 6 (29), 373–398 (in Russian).
 24. Semyonov N. N. (1958) *On Some Problems of Chemical Kinetics*. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ. 686 (in Russian).
 25. Kiselev V. P., Efremov A. A., Maksimov N. G., Ivanova L. A., Kemenev N. V. (2021) Changes in Bitumen During Autooxidation and Thermo-Oxidative Exposure, Stabilization of Properties. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*, (8), 13–24 (in Russian).