

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-4-291-302>

УДК 621.644.07:665.775:620.193.91

Комплексный анализ битумно-мастичных покрытий стальных подземных распределительных газопроводов

Часть 2

Механизм и ключевые особенности старения покрытий в эксплуатационных условиях

Н. В. Струцкий¹⁾, докт. техн. наук, проф. В. Н. Романюк²⁾

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

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

Реферат. Данная статья представляет собой вторую часть исследования, посвященного комплексному анализу битумно-мастичных изоляционных покрытий (БМИП), применяемых на стальных подземных распределительных газопроводах в Республике Беларусь. С учетом достижения длительных сроков службы влияние технологической стадии (производство битума и мастик, трубоизоляционные работы) на текущее состояние покрытий полностью исчерпано, и определяющей является стадия эксплуатации. Раскрыта связь почвенно-грунтовых условий с ключевыми особенностями эксплуатационного старения БМИП: сочетание ограниченного доступа молекулярного кислорода и умеренного температурного режима (низкая скорость кислородного окисления), возможность биокоррозии битумных и полимерных компонентов покрытия, комплексное воздействие грунтовой влаги (гидролиз, эффект Ребиндера, транспорт кислорода и катализаторов), непрерывное механическое воздействие грунта с участием влаги. Раскрыт механизм эксплуатационного разрушения БМИП, заключающийся в накоплении внутренних напряжений, деградации физико-химических и реологических свойств мастичного материала и его последующем разрушении под действием грунтовых нагрузок. Функциональный отказ покрытия при этом заключается в потере его барьерных и диэлектрических свойств, образовании физического и электрического контакта грунтового электролита с металлической поверхностью трубы. Рассмотрен вопрос влияния, оказываемого на долговечность битумных мастик и соответственно мастичных изоляционных покрытий пластифицирующими добавками. Установлено, что, наряду с положительным эффектом расширения температурного диапазона применения битумных материалов при проведении трубоизоляционных работ, введение нефтяных пластификаторов в виде промышленных масел в дальнейшем снижает стабильность битумной матрицы, способствует ускоренному старению и развитию дефектообразования БМИП (потере когезии, трещинообразованию и т. д.) на стадии эксплуатации.

Ключевые слова: стальной подземный газопровод, битумно-мастичные защитные покрытия, почвенно-грунтовые условия, эксплуатационное старение, дефектообразование, электрическое сопротивление

Для цитирования: Струцкий, Н. В. Комплексный анализ битумно-мастичных покрытий стальных подземных распределительных газопроводов. Ч. 2: Механизм и ключевые особенности старения покрытий в эксплуатационных условиях / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2026. Т. 69, № 4. С. 291–302. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-4-291-302>

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 2

The Mechanism and Key Features of Coating Aging under Operational Conditions

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

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

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

Abstract. This article is the second part of our study devoted to a comprehensive analysis of bitumen-mastic insulation coatings (BMIC) used on steel underground distribution gas pipelines in the Republic of Belarus. Given the achievement of long service life, the influence of the technological stage (production of bitumen and mastic, pipe insulation works) on the current condition of the coatings has been completely exhausted, and the operational stage is the determining factor. The relationship between soil and subsoil conditions and the key features of operational aging of BMIP has been revealed, i.e. a combination of limited access to molecular oxygen and a moderate temperature regime (low rate of oxygen oxidation), the possibility of biocorrosion of bitumen and polymeric coating components, and the combined effects of soil moisture (hydrolysis, the Rebinder effect, oxygen and catalyst transport) and continuous mechanical impact from soil with the inclusion of moisture. The mechanism of operational destruction of BMIP is revealed, which consists in the accumulation of internal stresses, degradation of the physical-chemical and rheological properties of the mastic material, and its subsequent destruction under the influence of ground loads. The functional failure of the coating consists in the loss of its barrier and dielectric properties, and the formation of physical and electrical contact between the ground electrolyte and the metal surface of the pipe. The impact of plasticizing additives on the durability of bitumen mastics and, consequently, on the durability of bituminous insulation coatings is considered. It has been established that along with the positive effect of expanding the temperature range of bitumen materials used in pipe insulation work, the introduction of petroleum plasticizers in the form of industrial oils further reduces the stability of the bitumen matrix, promotes accelerated aging and the development of defect formation of BMIP (loss of cohesion, cracking, etc.) at the operational stage.

Keywords: steel underground gas pipeline, bitumen-mastic protective coatings, soil and ground conditions, operational aging, defect formation, electrical resistance

For citation: Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2026) Comprehensive Analysis of Bitumen-Mastic Coatings on Steel Underground Distribution Gas Pipelines. Part 2: The Mechanism and Key Features of Coating Aging under Operational Conditions. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (4), 291–302 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-4-291-302>

Введение

Для битумно-мастичных изоляционных покрытий (БМИП) как покрытий горячего нанесения доэксплуатационная стадия включает этапы: производства битума, изготовления битумной мастики, дополнительного разогрева готовой мастики (когда используется мастика заводского изготовления, доставляемая на место проведения изоляционных работ в фасованном виде), трубоизоляционных работ.

В зависимости от принятой технологической схемы (прямой отгон, воздушное окисление, термоуплотнение сырья) температура в зоне реакции/отбора остатка при производстве битума находится в диапазоне 150–280 °С,

достигая 300–400 °С при использовании технологии вакуумной перегонки. Изготовление битумных изоляционных мастик (внесение в битум наполнителей и перемешивание до состояния однородности) осуществляется при температуре 180–190 °С, температурный режим при разогреве мастики составляет 140–150 °С.

Таким образом, все стадии технологического этапа предполагают активное температурное воздействие на битумное связующее. При этом для каждого из указанных температурных диапазонов существуют временные рамки, при выходе за которые начинает фиксироваться ускоренное технологическое старение битума, вплоть до его коксования (образования и роста мезофазы в виде карбенов, карбоидов).

С учетом особенностей изготовления и нанесения БМИП несоблюдение температурно-временного режима на любом из этапов производства битумных материалов и проведения трубоизоляционных работ может приводить к дополнительной неоднородности начального состояния покрытия и, как следствие, значительному разбросу в показателях достигнутой долговечности [1].

Вместе с тем с учетом достигнутых основной массой стальных газопроводов сроков службы 30–60 лет допустимо считать, что влияние факторов, имевших место на технологической стадии, к настоящему моменту уже исчерпано (полностью проявило себя) и стадия эксплуатации является определяющей с точки зрения актуального состояния существующих БМИП.

Следует отметить, что условия эксплуатации изоляционных покрытий стальных подземных трубопроводов весьма специфичны, что обусловлено специфичностью самой почвенно-грунтовой среды, представляющей собой чрезвычайно сложную и динамически изменчивую многокомпонентную физико-химическую систему, содержащую твердые, жидкие, газообразные и живые составляющие [2–6]. В этой связи для адекватного понимания механизма старения битумно-мастичных покрытий стальных подземных газопроводов необходим отдельный тщательный анализ влияющих гидрологических, геологических, биологических и других почвенно-грунтовых факторов.

Основная часть

Характерные особенности почвенно-грунтовых условий, их влияние на БМИП подземных газопроводов. Прежде всего отмеченная выше специфичность почвенно-грунтовой среды применительно к механизму старения БМИП выражается в уникальном сочетании основных факторов, влияющих на интенсивность окислительных процессов: доступности молекулярного кислорода (основного окислительного агента), температуры и влажности.

На глубинах прокладки подземных газопроводов (обычно 0,8–1,5 м) содержание кислорода в почве существенно ниже атмосферного в силу его потребления биотой и расхода на химические процессы. Газообмен почвенного воздуха с атмосферой происходит преимущественно за счет диф-

фузии, обусловленной градиентом концентрации, и зависит от влажности, гранулометрического состава и плотности грунта [5, 6]. По мере увлажнения и уплотненности почвенно-грунтовой среды доставка кислорода к поверхности битумного покрытия замедляется, ограниченная диффузия кислорода контролирует интенсивность окислительных процессов.

Также следует отметить щадящий режим эксплуатации подземных распределительных газопроводов, обусловленный тепловой инерционностью грунта. Согласно справочным данным [7], полученным путем непосредственных измерений температуры почвы вытяжными термометрами за тридцатилетний период, годовые перепады температур в почве на глубинах 0,8 и 1,6 м на территории Беларуси варьируются в пределах 13,2–17,2 и 9,9–14,3 °С соответственно. Среднегодовые температуры находятся в пределах 7,8–9,6 °С для указанного диапазона глубин (табл. 1).

Таблица 1

Температуры и температурные перепады в почве на глубинах 0,8 и 1,6 м
Temperatures and temperature differences in the soil at depths of 0.8 and 1.6 m

Глубина, м	Область, пункт наблюдения										
	Брестская		Витебская			Гомельская		Гродненская	Минская		Могилевская
	Брест	Пинск	Верхнедвинск	Шарковщина	Березинский заповедник	Гомель	Василевичи	Новогрудок	Минск	Марьяна Горка	Горки
	<u>Перепад среднемесячных температур, °С</u>										
	Средняя годовая температура, °С										
0,8	<u>15,9</u> 9,6	<u>15,5</u> 9,2	<u>15,1</u> 7,9	<u>14,4</u> 7,9	<u>16,5</u> 8,2	<u>17,2</u> 9,2	<u>16,1</u> 8,9	<u>13,2</u> 8,2	<u>13,7</u> 8,1	<u>16,1</u> 8,6	<u>14,6</u> 7,8
1,6	<u>12,4</u> 9,6	<u>12,4</u> 9,3	<u>10,7</u> 7,9	<u>9,9</u> 7,9	<u>12,9</u> 8,1	<u>14,3</u> 9,3	<u>12,9</u> 8,8	<u>10,7</u> 8,2	<u>11,3</u> 8,0	<u>13,3</u> 8,5	<u>11,1</u> 7,8

Таким образом, по сравнению с битумными вяжущими, используемыми в дорожном строительстве, или битумными кровельными материалами БМИП подземных распределительных газопроводов находятся в гораздо менее агрессивных окислительных условиях (ограниченный доступ кислорода, стабильная невысокая температура, отсутствие влияния УФ-излучения), что делает процесс окислительного старения покрытия сравнительно малоинтенсивным.

Вместе с тем почвенно-грунтовые условия характеризуются другими факторами, влияние которых выражено более сильно по сравнению с, например, атмосферными условиями эксплуатации. В первую очередь к таким факторам следует отнести воздействие почвенной влаги (грунтового электролита).

Это связано, во-первых, с более длительным (непрерывным) и интенсивным контактом влаги с битумом в подземных условиях, а во-вторых, с большей химической насыщенностью и агрессивностью почвенной влаги по сравнению с атмосферной. Грунтовый электролит представляет собой водную фазу, насыщенную ионами растворенных солей (карбонатами, сульфатами, хлоридами, нитратами кальция, магния, натрия), органическими веществами, растворенными газами [6].

Соответственно почвенная влага выступает как растворитель и переносчик кислорода и каталитических примесей (ионных комплексов, органических ферментов и т. д.): проникая в микропоры и дефекты материала, она переводит окислительный процесс из поверхностного в объемный и распространяет его на глубинные зоны покрытия. Также вода сама по себе участвует в гидратации и гидролизе компонентов битума, в результате чего создаются новые активные гидроксильные и карбоксильные группы. Таким образом, гидролиз и окисление взаимно усиливают друг друга: гидролиз разрушает молекулярные связи и создает новые активные центры, более доступные для окисления, а окисление образует кислородсодержащие продукты, которые легче гидролизуются.

Воздействие грунтовой влаги следует рассматривать как фактор не только химической деградации покрытия, но и его механохимического разрушения в рамках эффекта Ребиндера, который проявляется при совместном воздействии механических нагрузок и грунтовой жидкости на поверхностный слой покрытия, приводя к снижению его поверхностной прочности. Механизм эффекта заключается в деформации и ослаблении межатомных связей твердого тела за счет адсорбции поверхностно-активных веществ (ПАВ) среды, снижении энергии разрыва и, в конечном итоге, разрыве этих ослабленных связей, появлении в материале дополнительных концентраторов напряжений и затем микротрещин [8].

Наконец, как будет показано ниже, водная составляющая вносит большой вклад в общее механическое нагружение покрытия (давление грунта).

Весьма характерным фактором старения БМИП в условиях почвенно-грунтовой среды является также микробиологическое воздействие. Способность микроорганизмов разлагать углеводороды хорошо известна. Микробиологическая коррозия (Microbiologically Influenced Corrosion (MIC)) представляет серьезную опасность для битумных материалов. Почвенные бактерии, археи и грибы могут получать питательные вещества из водорастворимых низкомолекулярных компонентов покрытий, подвергая их био-разложению [9].

Микроорганизмы прикрепляются к поверхности битума, формируя плотные биопленки, и секретируют внеклеточные ферменты, участвующие в окислительных и гидролитических реакциях. Влага благоприятствует микроорганизмам, в глинистых и переувлажненных грунтах создаются анаэробные условия, где роль биохимического окисления по сравнению с прямым окислением кислородом в общем процессе деградации покрытия возрастает.

При этом кислотные метаболиты и другие химические продукты жизнедеятельности микроорганизмов воздействуют не только на покрытие, но

и на почвенную среду, в свою очередь делая ее привлекательной для других микроорганизмов, то есть возникает кумулятивный (накопительный) эффект [10].

К наиболее агрессивным по отношению к битумно-мастичным изоляционным покрытиям можно отнести анаэробные сульфатредуцирующие бактерии (СРБ) и микроскопические грибы (микромицеты). Кроме воздействия выделяемых ферментов, микромицеты могут создавать мицелиальные структуры (гифы), которые физически проникают в материал, углубляясь в поры и микротрещины, ускоряя микротрещинообразование и расслоение покрытия.

Таким образом, действие микроорганизмов подвергает битум дополнительной нагрузке, ускоряя его переход к более жесткой и хрупкой структуре. В [10] предполагается, что места наиболее интенсивного разрушения битумной изоляции трубопроводов обусловлены как раз микробиологическим воздействием. Наравне с битумом микробиологической коррозии подвержены также и полимерные материалы, используемые в мастиках в качестве наполнителя.

Внешние механические воздействия, итоговый механизм старения БМИП на стадии эксплуатации. Подземный трубопровод работает совместно с окружающим ее грунтом, который является основным источником механического нагружения газопровода и его защитного покрытия [11]. Механическое воздействие почвенно-грунтовой среды на покрытие носит непрерывный характер и включает давление грунта (в том числе твердых включений), касательные напряжения при продольных перемещениях трубопровода за счет температурного удлинения, самопроизвольные подвижки (просадки) грунта. Распределение основных напряжений, возникающих в изоляционном покрытии трубопровода в общем случае под грунтовым давлением показаны на рис. 1 [12].

Под давлением грунта понимается результирующее воздействие грунта, представляющее собой совокупность вертикального и горизонтального (бокового) давлений, действующих на трубу и ее изоляционное покрытие и возникающих за счет собственного веса грунта. Грунтовая влага при этом способствует не только изменению физических и химических свойств покрытия, но и увеличению общего веса грунта, а также набуханию глинистых частиц [12].

В результате вертикальное и горизонтальное давление верхнего и бокового грунта дополнительно включает в себя давление содержащейся в грунте влаги и давление набухания – внутреннее давление, возникающее в грунте при его замачивании водой.

Таким образом, давление, оказываемое грунтовой засыпкой на трубопровод, неравномерно, и изменяется по периметру трубы в зависимости от глубины залегания, плотности и влажности почвы. Сезонные колебания влажности ведут к циклическим нагрузкам и усталости покрытия с появлением потенциальных очагов будущих дефектов. Имеются данные, что давление, создаваемое влажным грунтом, может превышать расчетное, определенное с коэффициентом перегрузки 1,4 [12].

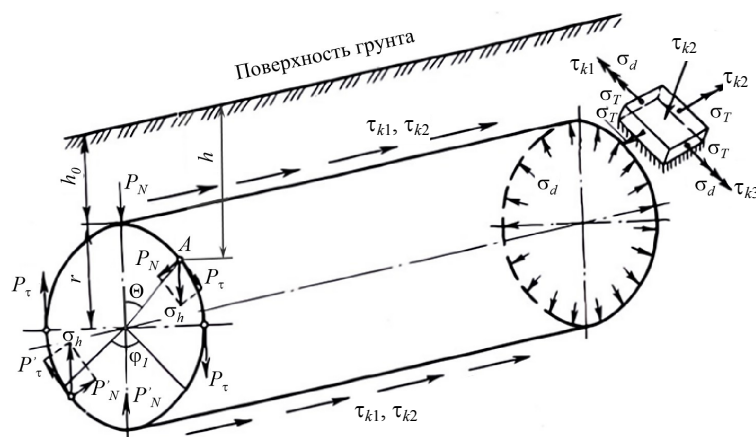


Рис. 1. Распределение основных напряжений в изоляционном покрытии [12]:

σ_h – напряжение от вертикального давления грунта; P_N и P_T – нормальная и касательная составляющие σ_h ; P'_N и P'_T – то же в пределах угла опирания трубы ϕ_1 ; σ_T – напряжение растяжения от температурных перепадов; σ_d – то же от внутреннего давления среды; τ_{k1} – касательные напряжения от температурных перепадов; τ_{k2} – то же от внутреннего давления; τ_{k3} – то же от вертикального давления грунта; h_0 – глубина заложения трубопровода; h – расстояние от уровня земли до точки A на покрытии; Θ – угол между вертикальным диаметром трубы и радиусом r , проведенным в точку A

Fig. 1. Distribution of the main stresses in insulation coating [12]:

σ_h is the stress from vertical ground pressure; P_N and P_T are the normal and tangential components of σ_h ; P'_N and P'_T are the same, within the angle of support of pipe ϕ_1 ; σ_T is the tensile stress from temperature fluctuations; σ_d is the same, from internal pressure of the medium; τ_{k1} – tangential stresses from temperature fluctuations; τ_{k2} – the same from internal pressure; τ_{k3} – the same from vertical ground pressure; h_0 – the depth of the pipeline; h – the distance from ground level to point A on the coating; Θ – the angle between the vertical diameter of the pipe and the radius r , drawn to point A

Продольные перемещения трубопроводов в первую очередь зависят от температурных колебаний в почвенно-грунтовой среде, вместе с тем, как уже указывалось выше, на обычных глубинах заложения распределительных газопроводов амплитуды температурных перепадов, как правило, достаточно невелики. Самопроизвольные подвижки грунта в отдельных случаях могут быть обусловлены взаимодействием гравитационных сил, особенностей рельефа и физических свойств грунтов на конкретном участке трассы. Влияние давления внутренней среды, не превышающего для распределительных газопроводов 1,2 МПа, можно считать пренебрежимо малым.

Одной из распространенных причин повреждений БМИП, обладающих сравнительно низкой прочностью, является также механическое воздействие со стороны корневых систем древесно-кустарниковой растительности, которое тоже можно отнести к почвенно-грунтовым.

Механизм старения БМИП подземных трубопроводов с учетом указанных выше факторов показан на рис. 2.

В реальных условиях эксплуатации подземных трубопроводов все перечисленные факторы действуют на изоляционные покрытия комбинированно, в различных сочетаниях.



Рис. 2. Механизм эксплуатационного старения
битумно-мастичных изоляционных покрытий подземных трубопроводов

Fig. 2. The mechanism of operational aging of underground pipelines

Под воздействием кислорода почвенного воздуха и/или внеклеточных ферментов микроорганизмов (преобладающий путь окисления зависит от влажности, структуры и текстуры грунта, его микробиологического профиля) в подземных условиях протекает постепенный процесс автоокисления битумных углеводородов, изменения химического и компонентного состава БМИП. Происходит структурная перестройка битумной матрицы, повышается жесткость коагуляционной сетки, в различных местах которой возникают концентраторы напряжений. Потеря легких фракций приводит к усадке материала и формированию растягивающих усадочных напряжений внутри покрытия. Внутренние напряжения инициируют процесс образования микротрещин.

Снаружи на покрытие постоянное механическое воздействие оказывает грунт. Нормальная составляющая напряжения от вертикального давления грунта P_N и касательная составляющая P_τ от бокового давления грунта засыпки производят работу на смятие изоляции, развивая процесс трещинообразования, а также создают усилия, расклинивающие уже образовавшиеся трещины [13]. Почвенная влага усиливает механическое воздействие грунта, придавая ему цикличность, а также разрушающе влияет на верхний слой покрытия через гидролитические реакции и эффект Ребиндера – адсорбционное снижение прочности материала под совместным воздействием ПАВ среды и механических нагрузок [14].

По мере потери пластических свойств покрытие реагирует на контактные напряжения не как гибкий слой, распределяющий напряжения по периметру трубы, а как жесткая оболочка, воспринимающая контактные напряжения на себя и накапливающая деформации, микро-, а затем и макродефекты. Таким образом постепенно происходит необратимое механическое разрушение битумного покрытия.

С точки зрения функционального назначения изолирующего покрытия, его выход из строя происходит до момента полного разрушения, а частичная потеря функции может произойти задолго до этого момента. По мере

нарушения микроструктуры покрытия его насыщение почвенным электролитом усиливается через микропоры и микротрещины, электроизолирующие свойства (электрическое сопротивление) снижаются. При отсутствии или недостаточных режимах работы электрохимической защиты этого может быть достаточно для начала коррозионных процессов в стенке трубы. На следующей стадии в покрытии образуются сквозные дефекты и отдельные (точечные) контакты «труба – земля», чреватые возникновением очагов местной коррозии. При значительных разрушениях покрытия влага контактирует с металлом трубы на обширной площади, происходит полная потеря барьерных свойств покрытия на протяженных участках газопровода, возникает угроза сплошной коррозии.

Влияние, оказываемое пластификаторами битума. Для возможности проведения трубоизоляционных работ при пониженных температурах наружного воздуха в практике строительства широко практиковалось введение в битумные мастики пластифицирующих добавок (масло зеленое, масло осевое, масло автотракторное, полидиен и др.).

Пластификаторы вводятся в битумные вяжущие преимущественно для снижения вязкости и улучшения растяжимости, что облегчает нанесение мастики. Это позволяет сохранять высокие темпы строительства газопроводов даже в холодный период года, однако, как показали позднейшие исследования, пластификаторы (особенно нефтяные в виде промышленных масел) могут оказывать существенное негативное влияние на эксплуатационные качества битумных мастик.

В частности, в [15] в отношении промышленных масел, применяемых в качестве пластификаторов для битумно-полимерных вяжущих, указывается на их быструю «вымываемость» из структуры композита. Это объясняется тем, что указанные масла в основном (на 75–80 %) состоят из парафино-нафтеновых углеводородов, обладающих сравнительно небольшой плотностью ($890\text{--}910\text{ кг/м}^3$) и низкой растворяющей способностью к полярным соединениям битума, что определяет нестабильность внутренних связей в системе «битумное вяжущее – пластификатор».

Вымывание легких фракций приводит к появлению в материале пор и каналов, куда начинает проникать грунтовая влага, что особенно критично для антикоррозионных защитных покрытий, функциональная долговечность которых напрямую связана с их влагоустойчивостью и влагопроницаемостью.

Увеличение доли летучих компонентов и их дальнейшая потеря приводят к ускоренному обеднению мальтеновой фракции и росту хрупкости материала, увеличению усадки и усадочных напряжений, снижению структурной целостности битумного слоя. В работе [16] указывается, что введение маловязких легких компонентов для пластификации может привести к значительному снижению структурно-механических свойств материала, потере когезии, трещинообразованию и другим дефектам.

Основываясь на результатах экспериментальной оценки влияния различных пластификаторов на интенсивность деструкции битумных композитов (изменения массы и температуры размягчения после прогрева, расслаиваемости в тубе), в [17] делается вывод о том, что именно пласти-

фикатор может вносить основной вклад в процессы деструкции битумно-полимерных материалов в виде ускоренного старения, расслоения полимерной и битумной фаз. При этом прямо указывается на опасность использования промышленных масел в качестве пластификаторов с точки зрения потери качества продукции.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что с учетом достижения стальными газопроводами длительных сроков службы (30–60 лет) влияние факторов технологической стадии (изготовление битума и мастик, трубоизоляционные работы) к настоящему моменту полностью исчерпано и определяющей для текущего технического состояния битумно-мастичных изоляционных покрытий является стадия эксплуатации.

2. Установлены особенности почвенно-грунтовых условий, определяющие характер протекания процесса эксплуатационного старения битумно-мастичных изоляционных покрытий подземных газопроводов:

- сочетание ограниченного доступа молекулярного кислорода и щадящего температурного режима, обеспечивающее сравнительно низкую интенсивность прямого (кислородного) окисления битумных компонентов;
- возможность биокоррозии битумных и полимерных компонентов покрытия с участием внеклеточных метаболитов микроорганизмов (в первую очередь, таких как СРБ и микромицеты);
- комплексное воздействие грунтовой влаги (грунтового электролита), участвующей в гидролитических реакциях и реализации эффекта Ребиндера во внешнем слое покрытия, доставке кислорода и каталитических примесей от поверхности в объем покрытия;
- непрерывное во времени и пространстве механическое воздействие грунта на поверхность покрытия, в котором также участвует грунтовая влага.

3. Раскрыт механизм эксплуатационного старения битумно-мастичных изоляционных покрытий подземных распределительных газопроводов, заключающийся в постепенном накоплении в покрытии внутренних напряжений и его дальнейшем разрушении в результате нарастающей деградации физико-химических и структурных свойств мастичного материала и постоянно-переменных внешних грунтовых нагрузок.

4. Показано, что функциональный отказ изолирующего покрытия (потеря барьерных и диэлектрических свойств) наступает при возникновении физического и электрического контакта грунтового электролита и металла трубы (так называемого контакта «земля – труба»), то есть, как правило, до его полного механического разрушения.

5. Установлено негативное влияние на итоговую долговечность битумно-мастичных изоляционных покрытий пластифицирующих добавок в виде промышленных масел, ранее широко использовавшихся при изготовлении битумных мастик в целях расширения температурного диапазона их применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Струцкий, Н. В. Комплексный анализ битумно-мастичных покрытий стальных подземных распределительных газопроводов. Ч. 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. 70, № 3. С. 263–275. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-3-263-275>
2. Романюк, В. Н. Почвенно-грунтовые факторы, влияющие на процесс коррозии стальных подземных трубопроводов, и их компьютерное моделирование / В. Н. Романюк, А. М. Нияковский, Н. В. Струцкий, А. Л. Свистун // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 3. С. 230–244. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-230-244>
3. 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>
4. Околелова, А. А. Экологическое почвоведение и законы экологии: учеб. пособие / А. А. Околелова, В. Ф. Желтобрюхов, Г. С. Егорова. Волгоград: ВГАУ-ВолгГТУ, 2017. 216 с.
5. Жумабекова, Б. К. Основы почвоведения: учеб. пособие / Б. К. Жумабекова; Российская акад. естествознания. М.: Акад. естествознания, 2015. 147 с.
6. Основы почвоведения: учеб. пособие / Б. Ф. Пшеничников, Н. Ф. Пшеничникова, В. Г. Трегубова, А. В. Брикманс. Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2021. 69 с.
7. Справочник по климату Беларуси. Ч. I: Температура воздуха и почвы. Минск: Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, 2017. 85 с.
8. Малкин А. И. Закономерности и механизмы эффекта Ребиндера / А. И. Малкин // Коллоидный журнал. 2012. № 2 (74). С. 239–256.
9. Corrosion of Buried Steel at New and In-Service Infrastructure / National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC: The National Academies Press, 2023. 148 p. <https://doi.org/10.17226/26686>
10. Битумные материалы. Асфальты, смолы, пеки / под ред. А. Дж. Хойберга. М.: Химия, 1974. 248 с.
11. Макаров, А. В. Надежная эксплуатация стальных водопропускных труб / А. В. Макаров, Д. Р. Морозов, Д. Д. Лозинская // Инновационная наука. 2020. № 2. С. 25–27.
12. Борисов, Б. И. Несущая способность изоляционных покрытий подземных трубопроводов / Б. И. Борисов. М.: Недра, 1986. 160 с.
13. Никифоров, Д. А. Повышение несущей способности изоляционных покрытий подземных трубопроводов / Д. А. Никифоров, Н. В. Абдуллин // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2020. № 4. С. 57–60. <https://doi.org/10.24411/0131-4270-2020-10410>
14. Кузнецов, В. В. Физическая и коллоидная химия: учеб. пособие для биологических специальностей университетов / В. В. Кузнецов, В. Ф. Усть-Качкинцев. М.: Высш. шк., 1976. 277 с.
15. Махмутова, А. Р. Разработка инновационных долговечных битумных вяжущих материалов на основе процессов модифицирования: дис. ... канд. техн. наук: 2.6.12 / Махмутова Алина Рауфовна; Уфимский государственный нефтяной технический университет. Уфа, 2025. 153 с.
16. Паршукова, О. Р. Совершенствование технологии получения дорожных битумов с целью улучшения их низкотемпературных свойств: дис. ... канд. техн. наук: 2.6.12 / Паршукова Ольга Расимовна; Самарский государственный технический университет. Самара, 2025. 162 с.
17. Киндеев, О. Н. Влияние вида пластификатора на свойства битума и полимерно-битумных вяжущих / О. Н. Киндеев, М. А. Высоцкая, С. Ю. Шеховцова // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2016. № 1. С. 26–30.

Поступила 01.02.2026 Подписана в печать 06.04.2026 Опубликована онлайн 31.07.2026

REFERENCES

1. 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. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions*, 70 (3), 263–275 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-3-263-275>
2. Romaniuk V. N., Niyakovskii A. M., Strutsky N. V., Svistun A. L. (2025) Soil and Ground Factors Affecting the Steel Underground Pipelines Corrosion Process and their Computer Simulation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions*, 68 (3), 230–244 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-230-244>
3. 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>
4. Okolelova A. A., Zheltobrukhova V. F., Egorova G. S. (2017) *Ecological Soil Science and Ecology Laws*. Volgograd, VGU Publ., 219 (in Russian).
5. Zhumabekova B. K. (2015) *Fundamentals of Soil Science*. Moscow, Academy of Natural Sciences Publ., 147 (in Russian).
6. Pshenichnikov B. F., Pshenichnikova N. F., Tregubova V. G., Brikmanas A. V. (2021) *Fundamentals of Soil Science*. Vladivostok, Far Eastern Federal University Publ. 69 (in Russian).
7. *Climate Handbook of Belarus. Part I. Air and Soil Temperature*. Minsk, Republican Center for Hydrometeorology, Radioactive Pollution Control and Environmental Monitoring Publ., 2017. 85 (in Russian).
8. Malkin A. I. (2012) Regularities and mechanisms of the Reh binder's effect. *Colloid Journal*, 74 (2), 223–238. <https://doi.org/10.1134/s1061933x12020068>
9. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2023) *Corrosion of Buried Steel at New and In-Service Infrastructure. Consensus Study Report*. Washington, The National Academies Press Publ., 162. <https://doi.org/10.17226/26686>
10. Hoiberg A. J. (1979) *Bituminous materials: asphalts, tars and pitches*. NY, R. E. Krieger Pub. Co. 446.
11. Makarov A. V., Morozov D. R., Lozinskaya D. D. (2020) Reliable Operation of Steel Culverts. *Innovatsionnaya nauka [Innovative Science]*, (2), 25–27 (in Russian).
12. Borisov B. I. (1986) *Load-Bearing Capacity of Insulating Coatings of Underground Pipelines*. Moscow, Nedra Publ., 160 (in Russian).
13. Nikiforov D. A., Abdullin N. V. (2020) Increasing the Carrying Ability of Insulation Coatings of Underground Pipelines. *Transport i khraneniye nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya = Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*, (4), 57–60 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/0131-4270-2020-10410>
14. Kuznetsov V. V., Ust'-Kachkinov V. F. (1976) *Physical and Colloid Chemistry*. Moscow, Vysshaya shkola Publ. 277 (in Russian).
15. Makhmutova A. R. (2025) *Development of Innovative Durable Bitumen Binder Materials Based on Modification Processes* [PhD Thesis]. Ufa. 153 (in Russian).
16. Parshukova O. R. (2025) *Improvement of Road Bitumen Production Technology to Enhance Their Low-Temperature Properties* [PhD Thesis]. Samara, 162 (in Russian).
17. Kindeev O. N., Vysotskaya M. A., Shekhovtsova S. Y. (2016) The Effect of Type of Plasticizer on the Properties of Bitumen and Polymer-Bitumen Binders. *Vestnik BGTU imeni V. G. Shukhova = Bulletin of the BSTU Named after V. G. Shukhov*, (1), 26–30 (in Russian).

Received: 01 February 2026

Accepted: 06 April 2026

Published online: 31 July 2026