

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-230-244>

УДК 622.691.4: УДК 620.193.01

Почвенно-грунтовые факторы, влияющие на процесс коррозии стальных подземных трубопроводов, и их компьютерное моделирование

В. Н. Романюк¹⁾, А. М. Нияковский²⁾, Н. В. Струцкий³⁾, А. Л. Свистун¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾УО «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой»
(Новополоцк, Республика Беларусь),

³⁾Государственное предприятие «НИИ Белгипротогаз» (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Коррозия различных газопроводов, в особенности такая ее распространенная разновидность, как электрохимическая, представляет собой главную угрозу для стальных подземных трубопроводов на стадии эксплуатации. Негативный эффект коррозии заключается в прямых потерях металла, увеличении материальных и трудовых затрат на обслуживание, ремонт и замену трубопроводов, простоем оборудования, ухудшении безопасности и экологической ситуации в случае выхода перекачиваемого продукта (особенно, если это горючий газ или нефть и нефтепродукты) в окружающую среду. В статье приводится анализ комплекса почвенно-грунтовых факторов, влияющих на интенсивность коррозионных процессов, протекающих на подземных стальных трубопроводах, освещены актуальные исследовательские подходы к данному вопросу, отечественные и зарубежные источники. Рассмотрены ключевые параметры, определяющие коррозионную агрессивность грунта, такие как влажность, аэрированность грунта, его физико-механические свойства, химический состав грунтового электролита (в том числе содержание хлоридов и сульфатов), наличие ряда специфических почвенных микроорганизмов. Рассматривается возможность и устанавливается вывод о целесообразности использования методов компьютерного моделирования для оценки воздействия ключевых параметров с применением современных программных средств, в частности программных сред SOLID и ANSYS, а также технологий нейросетевого моделирования. Компьютерное моделирование предоставляет широкие возможности для анализа и предсказания процессов коррозии в зависимости от изменения условий окружающей среды, что может иметь важное прикладное значение для лучшего понимания данных процессов и их влияния на надежность и долговечность стальных подземных трубопроводов в данных конкретных условиях.

Ключевые слова: стальной подземный газопровод, электрохимическая коррозия, почвенно-грунтовые факторы, компьютерное моделирование, программная среда, искусственные нейронные сети

Для цитирования: Почвенно-грунтовые факторы, влияющие на процесс коррозии стальных подземных трубопроводов, и их компьютерное моделирование / В. Н. Романюк [и др.] // *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>

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

Soil and Ground Factors Affecting the Steel Underground Pipelines Corrosion Process and their Computer Simulation

V. N. Romaniuk¹⁾, A. M. Niyakovskii²⁾, N. V. Strutsky³⁾, A. L. Svistun¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (Novopolotsk, Republic of Belarus),

³⁾Design Research Republican Unitary Enterprise “NII Belgiprotogaz”
(Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Corrosion of various gas pipelines, especially such widespread type of it as electrochemical ones, is the main threat to steel underground pipelines during the operational phase. The negative effect of corrosion is the direct loss of metal, increased material and labor costs for maintenance, repair and replacement of pipelines, equipment downtime, deterioration of safety and environmental situation in case of release of the pumped product (especially if it is combustible gas or oil and petroleum products) into the environment. The article provides an analysis of the complex of soil-and-soil factors affecting the intensity of corrosion processes occurring on underground steel pipelines, and highlights current research approaches to this issue as well as domestic and foreign relevant literature sources. The key parameters determining the corrosive aggressiveness of the soil, such as humidity, soil aeration, its physical-and-mechanical properties, the chemical composition of the soil electrolyte (including the content of chlorides and sulfates), the presence of a number of specific soil microorganisms, are considered. The possibility and expediency of using the computer simulation method to assess their impact using modern software tools, in particular, the SOLID and ANSYS software environments, as well as neural network modeling technologies, are considered and demonstrated. Computer simulation provides ample opportunities for analyzing and predicting corrosion processes depending on changes in environmental conditions, which can be of great practical importance for a better understanding of these processes and their impact on the reliability and durability of steel underground pipelines in these specific conditions.

Keywords: steel underground gas pipeline, electrochemical corrosion, soil and ground factors, computer simulation, software environment, artificial neural networks

For citation: 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. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (3), 230–244. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-3-230-244> (in Russian)

Введение

Подземный металлический трубопровод эксплуатируется в почве (грунте), то есть в чрезвычайно сложной и динамически изменчивой вмещающей среде [1]. Почву (грунт) можно определить как многокомпонентную химическую систему, содержащую твердые, жидкие и газообразные соединения, находящиеся под действием электромагнитного и гравитационного полей и непрерывно изменяющиеся под действием биологических, гидрологических и геологических факторов [2].

Внешняя среда оказывает на трубопровод целый комплекс воздействий, в том числе коррозионное воздействие на металл трубы. Коррозионные процессы отличаются сложностью и многоступенчатостью. Первопричиной коррозии металлов и сплавов является их термодинамическая неустой-

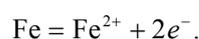
чивость в условиях внешней среды, что обуславливает возможность самопроизвольного перехода металлов и сплавов в большее устойчивое окисленное состояние [3].

Мерой термодинамической неустойчивости служит изменение энергии Гиббса (изобарно-изотермического потенциала) $\Delta_r G_{p,T}^0$, которое происходит при взаимодействии металла с коррозионно-активными веществами окружающей среды. С точки зрения термодинамики, коррозионный процесс возможен лишь при $\Delta_r G_{p,T}^0 < 0$. Чем большее отрицательное значение $\Delta_r G_{p,T}^0$, тем выше термодинамическая возможность коррозионного процесса. При этом термодинамика указывает на возможность или невозможность протекания коррозионного процесса, а его скорость определяется кинетикой и массопереносом [4, 5].

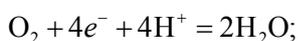
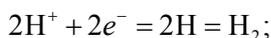
Существуют различные типы коррозионных процессов, каждый из которых имеет свои особенности. Для почвенных условий наиболее характерна электрохимическая коррозия – самопроизвольное разрушение металлических материалов вследствие электрохимического взаимодействия их с окружающей электролитически проводящей средой (почвенным электролитом – в данном случае).

Процесс электрохимической коррозии является гетерогенным и протекает на границе раздела «металл – коррозионная среда». На поверхности корродирующего металла возникают анодные (активные) и катодные (пассивные) участки. Таким образом, разрушение металла происходит под действием тока работающих гальванопар [3, 5, 6].

Ионизация атомов металла и восстановление окислительного компонента коррозионной среды протекают раздельно. Анодный процесс сопровождается переходом гидратированных ионов металла в раствор, для железа (стали) процесс будет иметь вид



Катодный процесс сопровождается восстановлением окислителя:
– водорода (в кислотной среде):



– кислорода (в нейтральной или щелочной среде).



В результате электрохимической коррозии происходит как образование нерастворимых продуктов (ржавчины), так и растворение металла в электролите [3, 4].

Если механизм почвенной коррозии определяется электрохимической гетерогенностью (неоднородностью) на границе раздела «металл – внеш-

няя среда», то сама эта неоднородность, в свою очередь, складывается из неоднородности металла (химической, структурной и др.) и неоднородности внешней среды. При этом степень гетерогенности вмещающей среды при подземной прокладке стального газопровода неизмеримо выше, чем у материала трубы, вследствие чего именно почвенно-грунтовые факторы определяют протекание процесса коррозии и требуют изучения в первую очередь. Вместе с тем отмеченная чрезвычайная изменчивость почвенных условий одновременно усложняет задачу их изучения и анализа.

Основная часть

Учитывая актуальность вопроса изучения и анализа почвенно-грунтовых факторов, определяющих процесс коррозии подземных металлических сооружений и, в частности, стальных подземных трубопроводов, данная проблематика на постоянной основе привлекает внимание отечественных и зарубежных исследователей.

Традиционно к влияющим на протекание подземной коррозии стальных трубопроводов относят следующие основные факторы:

- структуру грунта;
- влажность грунта;
- температуру грунта;
- солевой состав грунтового электролита (в первую очередь, концентрацию хлоридов и сульфатов);
- водородный показатель (pH);
- воздухопроницаемость, аэрацию (содержание кислорода);
- газовый состав грунта (в первую очередь, содержание углекислого газа);
- электропроводность грунта;
- микробиологический состав (наличие сульфатовосстанавливающих бактерий, аэробных серобактерий).

При этом большинство факторов являются многоуровневыми. Так, например, влажность грунта, в свою очередь, будет зависеть от:

- уровня грунтовых вод;
- количества осадков;
- скорости фильтрации воды в грунте;
- скорости испарения воды с поверхности земли;
- рельефа местности и т. д.

Таким образом, число влияющих на процесс электрохимической коррозии факторов, даже если говорить об основных из них, чрезвычайно велико, к тому же практически все они в различной степени связаны между собой и имеют разнонаправленное взаимное влияние, давая в различных комбинациях различный результат. Исходя из этого все перечисленные выше факторы, как правило, не учитываются в факторной модели, и важным аспектом становятся подходы, применяемые различными исследователями к структурированию и группировке факторов, выявлению их взаи-

мосвязей, выделению ключевых параметров, определяющих итоговое воздействие почвенно-грунтовой среды на коррозионные процессы.

Так, в исследовании [7] отмечается, что интенсивность коррозии внешней поверхности трубопроводов зависит как от физического состояния и химического состава почвы и грунта, так и от климатических условий, которые влияют на температуру, влажность, химические и микробиологические процессы. Скорость коррозии металла в почве и грунте зависит от их свойств, а именно от влажности, а также структуры и пористости, которые определяют их влагоемкость и водопроницаемость. Среди влияющих факторов указываются минерализация грунтовых вод, воздухопроницаемость, удельное электрическое сопротивление грунта.

Имеет значение и то, что наибольшее количество трубопроводов проложено в дисперсных грунтах, состоящих из совокупности твердых частиц, зерен, обломков, других элементов, между которыми есть физические, физико-химические или механические структурные связи. Существенное влияние на коррозию трубопроводов оказывает гранулометрический состав грунтов – процентное содержание первичных (то есть не связанных в агрегаты) частиц различной крупности по фракциям, выраженное по отношению к их общей массе [8]. В почвах и грунтах присутствуют частицы размером от тысячных миллиметра до нескольких сантиметров. Соответственно, чем мельче частицы грунта, тем большую удельную поверхность они имеют и тем в большей степени они способны удерживать влагу. А поскольку размер глинистых частиц составляет менее 0,005 мм, при прочих равных условиях они очень хорошо удерживают влагу и в коррозионном отношении эти почвы и грунты неравноценны [7].

В обширном колумбийско-французском исследовании [9] рассмотрены основные факторы, влияющие на скорость коррозии подземных металлических конструкций. Авторы подвергли статистическому анализу массив данных (параметры почвы, глубина коррозионных повреждений) для определения корреляции между глубиной дефектов и окружающими почвенными условиями.

К ключевым факторам, способствующим внешней коррозии стальных трубопроводов, авторы относят влажность и аэрацию, от которых зависят катодные и анодные реакции на поверхности металла. Скорость коррозии увеличивается с повышением влажности почвы, однако при промежуточной степени насыщения влагой скорость коррозии достигает максимума, а затем снижается: потеря металла увеличивается до тех пор, пока вода не насыщает поры почвы, после чего снабжение кислородом сокращается, что приводит к снижению скорости коррозии. Помимо влагосодержания, важную роль в коррозии играет снабжение почвы кислородом. В целом почвы с большим содержанием воды и растворенного кислорода способствуют катодному процессу. Напротив, почвы с низким уровнем влаги и растворенного кислорода создают анодную область, которая способствует образованию точечной коррозии.

Реактивность почвы измеряется на основе значения pH , которое находится в диапазоне от 3,5 до 9,5. Скорость коррозии увеличиваются в кислых почвах, тогда как щелочные почвы способствуют пассивному состоянию, менее подверженному коррозии. Вместе с тем кислотность почвы сама по себе не является достаточным показателем для оценки коррозионных свойств почвы. В зависимости от удельного электрического сопротивления агрессивными в отношении коррозии могут быть как кислотные, так и очень щелочные почвы [9, 10]. Снижение удельного электрического сопротивления делает почву более коррозионно-активной. На удельное сопротивление почвы, в свою очередь, влияют ее пористость, плотность, содержание ионов и проводимость грунтовых вод.

Серьезную проблему для трубопроводов представляет собой активность бактерий, которые могут прикрепляться к поверхности металла, образуя биопленки, разрушающие металл посредством биохимических реакций, связанных с их ростом и размножением [11]. Один из самых распространенных типов бактерий в почве – сульфатредуцирующие бактерии. Они анаэробны, обитают в почвах с содержанием сульфатов, низким уровнем растворенного кислорода и pH от 6 до 8 [12], в хорошо аэрированных почвах их влияние на скорость коррозии незначительно. Используя сульфаты и питательные вещества, включая органические кислоты и продукты естественного разложения органики в окружающей почве, данные бактерии выделяют в качестве побочного продукта сероводород H_2S , который может взаимодействовать с металлом, образуя сульфид железа (II) FeS [9].

С учетом всех перечисленных выше параметров анализ статистических данных проводился в три этапа. На первом этапе каждая почвенная характеристика анализировалась индивидуально для проверки ее независимости от степени коррозии с использованием таблиц сопряженности и χ^2 -теста. На втором этапе применялся метод множественного анализа соответствий (Multiple Correspondence Analysis, MCA) на основе всего набора данных для выявления связей между категориями почвы и корреляции с глубиной коррозии. На третьем этапе использовался метод кластеризации K-mode, с помощью которого группировались сочетания характеристик, связанные с более глубокими дефектами коррозии, с целью выявления возможных агрессивных особенностей почвы [9].

Исследования [13], проведенные в Университете Монаша (Австралия), касались изучения взаимодействия электрохимических реакций и физических свойств почвы, окружающей подземные металлические трубопроводы. Для моделирования коррозионных процессов был выбран подход, использующий математические зависимости для описания формы кривой потери массы металла вследствие коррозии. Согласно модели коррозия уменьшается со временем, так как продукты коррозии накапливаются на поверхности металла. При этом скорость образования коррозионных продуктов зависит от влажности и аэрации почвы.

При низких уровнях влажности коррозия происходит на изолированных участках, с увеличением влажности общая площадь коррозии возрастает. Активная область включает в себя преимущественно анодные участки, где активно происходит коррозия.

Большинство продуктов коррозии, образующихся на поверхности трубы в результате коррозионных процессов, являются нерастворимыми и обладают низкой электрической проницаемостью. Осаждение таких продуктов создает экранирующий эффект, защищая металлическую поверхность от дальнейшей коррозии. Также известно, что образование определенных гидроксидов на поверхности металла может пассивировать металл термодинамически. Совокупное влияние этих механизмов заключается в замедлении окислительной реакции из-за накопления продуктов коррозии.

Образование продуктов коррозии зависит, среди прочих факторов, от уровня влажности окружающего грунта. В сухих грунтах ионы, образующиеся в результате реакций, соединяются, формируя продукты коррозии, которые осаждаются на поверхности. При увеличении уровня влажности ионы мигрируют от поверхности трубы, прежде чем объединиться для формирования нерастворимых продуктов коррозии. Следовательно, в грунтах с высокой влажностью экранирующий эффект продуктов коррозии относительно ниже, чем в грунтах с низкой влажностью.

Авторы разделяют вывод Коула (Cole) и Марни (Magney) в работе [14], согласно которому модель для точного описания коррозии в почвах должна включать такие пять уровней явлений, как:

- анодная/катодная активность;
- эффекты оксидов;
- поверхность раздела поровой влаги и поверхности трубы;
- динамика содержания почвенной воды/воздуха;
- макроокружение.

Представленная в статье [13] модель коррозионного процесса в той или иной форме включает все эти пять уровней с акцентом на влияние аэрации почвы.

В другой статье [15] той же группы исследователей из Университета Монаша обращается внимание на тот факт, что, хотя электрическая проводимость почвы важна для макроэлементной коррозии, которая обычно наблюдается в полевых условиях, она не оказывает прямого воздействия на равномерную коррозию, которая обычно оценивается в лабораторных экспериментах. Более важным фактором в случае равномерной коррозии является область участвующей в коррозионном процессе поверхности трубопровода, то есть фактическая площадь электрода, контактирующая с электролитом, которая в конечном итоге зависит от влажности почвы.

В источнике [16] представлены результаты исследования поведения коррозии стали X80 (высокопрочной стали, часто используемой при строительстве магистральных трубопроводов) в иловой почве. Пробы почвы были взяты в окрестностях подземных нефте- и газопроводов в районе Сяодянь города Тайюань (провинция Шаньси, Китай).

Методика эксперимента предполагала предварительную обработку и обессоливание почвы, а затем моделирование различных химических параметров среды с помощью введения в подготовленный грунт искусственного электролита. В данных условиях образцы стали X80 подвергались ускоренному ржавлению, в ходе которого исследовалась микро- и макро-морфология поверхности металла.

Анализ показал, что осадочный слой можно разделить на внутренний и внешний слои. Внутренний слой состоит из тонкой и плотной оксидной пленки железа с высоким содержанием Fe и небольшим количеством кислорода. Внешний слой, напротив, является более толстым, пористым, включает частицы почвы и характеризуется рыхлой текстурой и разрозненным распределением. На обоих слоях наблюдаются дефекты, такие как поры и сквозные трещины. Через зоны дефектов восстанавливающие агенты (грунтовая вода и коррозионные ионы) достигают поверхности стального субстрата, создавая каналы для их диффузии. Таким образом, осадочный слой не может служить долгосрочной защитой металла, что способствует возобновлению электрохимической реакции коррозии.

Концентрация ионов существенно влияет на количество язв (питтингов). С одной стороны, с увеличением концентрации ионов осадочный слой на стальной поверхности становится плотнее, однако высокая концентрация соли усиливает адсорбцию и способствует расширению области коррозии с формированием питтингов под осадочным слоем.

С увеличением концентрации ионов количество продуктов коррозии по мере растворения железа постепенно возрастает. В коррозионной среде, содержащей хлориды, при той же температуре в слоях ржавчины содержится больше кислорода и меньше железа, чем в сульфатосодержащей среде. Авторы делают выводы, что содержание кислорода зависит от адгезии почвы к поверхности металла и количества продуктов коррозии на ней, и влияние хлоридов на коррозию металла в целом сильнее, чем у сульфатов [16].

Близки по методике эксперимента исследования, представленные в [17]. В данном случае моделирование коррозии в лабораторных условиях с использованием искусственного грунтового раствора проводилось для образцов стали 5L Grade X60 стандарта API 5L.

Были изучены параметры анодной и катодной поляризации в зависимости от pH и температуры. Установлено, что, если значения pH уменьшаются и приближаются к нейтральному или кислому диапазону от 4,0 до 8,0, то коррозия стали увеличивается, сопротивление поляризации уменьшается и потенциал коррозии стремится к анодным значениям. В температурном диапазоне от 25 до 50 °C коррозия стали также зависит от температуры. Плотность тока коррозии увеличивается с повышением температуры, а потенциал коррозии стали смещается в сторону отрицательных значений. Изменения электрохимических параметров при воздействии температуры в исследуемом диапазоне от 25 до 50 °C для pH , близкого к нейтральному, подтверждают влияние температуры на коррозию стали в реальной почве

как результат сезонных колебаний температуры, если различие температур является значительным [17].

В исследованиях [18] были проведены электрохимические коррозионные испытания сталей марок Q235, X65, X70 и X80. Скорость электрохимической коррозии этих четырех низкоуглеродистых сталей в соленой почве определялась стадией, лимитирующей процесс, которая менялась в зависимости от состояния поверхности электрода и окружающей среды. В течение периода коррозионных испытаний коррозия стали Q235 в основном сопровождалась массопереносом, в то время как коррозия X65 переключалась с контроля переноса заряда на контроль массопереноса, смешанный контроль и, наконец, контроль переноса заряда. Коррозия X70 и X80 переключалась с контроля переноса заряда на контроль массопереноса, а затем обратно на контроль переноса заряда. Это указывало на то, что в данном эксперименте сталь Q235 не могла самостоятельно подавлять коррозионный процесс в условиях соленой почвы. Напротив, сформированные пленки продуктов коррозии на сталях X65, X70 и X80 в определенной степени замедляли скорость коррозии.

Скорости коррозии четырех низкоуглеродистых сталей показали общую тенденцию к снижению с увеличением времени коррозии. Скорости коррозии в средней и поздней ее стадиях были намного ниже, чем на начальной стадии, и колебались в течение периода испытаний, что было вызвано разрушением и повторным образованием оксидной пленки. Общая последовательность скорости коррозии для четырех низкоуглеродистых сталей была следующей: $Q235 > X65 \approx X70 > X80$.

Для всех четырех низкоуглеродистых сталей в соленой почве наблюдалась локальная коррозия, на поверхности образцов были видны явные коррозионные язвы, пористость и трещины. Накопление продукта коррозии на поверхности стали характеризовалось низкой однородностью и компактностью. Адсорбция ионов Cl^- из соленой почвы на поверхности электрода вызывала питтинговую коррозию, разрушая слой коррозионных отложений.

Химический состав четырех низкоуглеродистых сталей отличался, что стало главной причиной различного коррозионного поведения и стойкости к коррозии в одной и той же почвенной среде. Среди четырех сталей сталь X80 демонстрировала наилучшую коррозионную стойкость, стали X65 и X70 имели сходную коррозионную стойкость, а сталь Q235 имела самую низкую коррозионную стойкость [18].

Предметом изучения еще одной группы китайских ученых стало взаимное влияние коррозии и окружающих почвенных микробных сообществ почвы на стальные подземные нефтепроводы [19]. В данном случае образцы почв были собраны во время планового технического обслуживания нефтепровода Шэнли на месторождении Дунин (провинция Шаньдун, Китай).

В исследовании подчеркивается взаимное влияние между коррозией и микробной активностью. По мере того как трубопровод разрушается, вы-

деляются продукты, влияющие на микробные сообщества, а микроорганизмы, в свою очередь, могут ускорить дальнейшую коррозию. Это взаимодействие может приводить к обратным связям, где коррозия способствует росту микроорганизмов, а их активность усиливает коррозию, создавая непрерывный цикл, который может ухудшать целостность трубопроводов с течением времени [19].

В исследовании [20], проведенном Техническим университетом в Кошице (Словакия), изучаемым материалом была сталь EN 10028/2-92, взятая с подземного трубопровода после 48-летней эксплуатации. Коррозионные испытания проводились путем погружения вырезанных образцов стали (с коррозионным слоем и предварительно шлифованных) в подготовленный коррозионный электролит. Далее проводились электрохимические измерения и стереомикроскопия поверхности образцов. Барьерный эффект коррозионного слоя привел к значению поляризации сопротивления, превосходящему значение для шлифованной поверхности более чем в 5 раз. Скорость коррозии образца с коррозионным слоем оказалась на 72 % ниже по сравнению с поверхностью без него.

В исследовании [21] предлагается новая модель многофазного поля (multi-PF) для изучения сложного локализованного коррозионного процесса, включающего механико-электрохимическую связь, анодное растворение, образование нерастворимых продуктов коррозии и результирующую гальваническую точечную коррозию. Акцентируется внимание на влиянии концентрации ионов хлора Cl^- , значений pH и электрического поля, раскрывается автокаталитический процесс точечной коррозии под воздействием все более агрессивной внешней среды.

В условиях стремительного развития цифровых технологий в исследованиях почвенной коррозии подземных стальных трубопроводных коммуникаций, с учетом высокой сложности и вариативности коррозионных процессов и почвенной среды как таковой, свое применение находят компьютерные методы, в частности моделирование в программных средах, реализующих метод конечных элементов (SolidWorks Simulation, ANSYS), и нейросетевой анализ.

Например, в источнике [22] описывается применение компьютерного моделирования для исследования механизмов и закономерностей коррозионного растрескивания подземных трубопроводов, вызванного сочетанием коррозионных и механических нагрузок. Процессы коррозионного растрескивания смоделированы на участке подземного трубопровода длиной 1,5 м и толщиной стенки 20 мм, изготовленного из высокопрочной легированной стали типа X100. В центре участка трубопровода имеется коррозионная трещина эллиптической формы длиной 150 мм и глубиной 10 мм. Окружающая трубопровод почва играет роль почвенного электролита с заданными свойствами.

Для моделирования использовался программный продукт COMSOL-Multiphysics 5.6: CorrosionModule, включающий в себя два расчетных интерфейса – SolidMechanics (механика твердого тела) и Secondary Current

Distribution (вторичное распределение тока). Моделируемые параметры включают распределение напряжений, коррозионный потенциал, а также плотности анодного и катодного тока в зависимости от размера коррозионной трещины и продольной деформации растяжения, вызванной движением почвы. Модель, описанная в работе [22], применима для прогнозирования коррозионного растрескивания под напряжением подземных газопроводов, подверженных электрохимической коррозии и продольной деформации, вызванной движением грунта.

В статье [23] освещены результаты применения инструментов SolidWorks и COMSOL Multiphysics для моделирования и тестирования процесса коррозии подземных дегазационных трубопроводов, проложенных в шахтах. В результате исследования установлено, что дегазационная сеть шахт постоянно находится под воздействием механико-электрохимического взаимодействия, которое проявляется в продольных деформациях пород шахтного пола. Высокая интенсивность коррозии подземных трубопроводов является результатом взаимодействия металла, выступающего в качестве электрода, с подземными водами, выступающими в качестве электролита, а определяющими факторами процесса коррозии являются электропроводность почвы и деформационные процессы в трубопроводах. Компьютерная модель позволила проверить распределение напряжений, коррозионный потенциал, а также плотности анодных и катодных токов в зависимости от размера коррозионной трещины и продольной деформации пород.

Работа [24] представляет опыт применения программного комплекса ANSYS к расчету толстостенного трубопровода, подвергающегося высокотемпературной локальной водородной коррозии. В качестве ключевого преимущества ANSYS авторами указывается наличие встроенного языка параметрического программирования (APDL), позволяющего адаптировать программный комплекс к решению нестандартных задач.

Примером использования для моделирования коррозионных процессов на стальных подземных газопроводах технологий искусственных нейронных сетей (artificial neural network, ANN) являются упоминаемые выше исследования Университета Монаша [13, 15], в ходе которых была разработана нейронная сеть для прогнозирования скорости коррозии. В рамках данных исследований вначале проведен анализ коррозионного поведения трубопровода в условиях пространственно изменяющихся свойств грунта и с использованием программного обеспечения COMSOL 5.3 Multiphysics построена численная модель коррозии, учитывающая изменения почвенных параметров (для построения полей случайного распределения почвенных параметров был разработан отдельный программный модуль). На завершающем этапе создана искусственная нейронная сеть, обучение которой проводилось с помощью набора комбинаций входных и выходных параметров, полученных из численной модели. Сеть была создана с двумя узлами в каждом из входного и выходного слоев и 128 узлами в каждом из

скрытых слоев. Для настройки сети использовались нелинейная функция активации ReLU (Rectified Linear Unit) и алгоритм оптимизации Adam [25].

Сходимость результатов численной модели и нейросети была протестирована при моделировании процесса коррозии на контрольном участке трубопровода длиной 10 м и периодом эксплуатации 50 лет. Оба метода оказались близки в локализации коррозионных мест и характере коррозионного процесса. Несмотря на то что нейросеть показала некоторую тенденцию к переоценке величины и масштабов коррозионного пятна, она может быть использована для быстрого прогнозирования уровней коррозии на основе свойств грунта [13].

В исследовании [26] приводится сравнительный анализ методов поверхностного отклика (response surface methodology, RSM) из области многомерной математической статистики и искусственных нейронных сетей для предсказания скорости коррозии углеродистой стали в почве. Делается вывод, что, несмотря на сравнительную простоту прямой (feed-forward) архитектуры сети, которая считается менее точной, чем обратные (feedback) сети, она лучше подходит для моделирования взаимосвязей входных данных с одним или несколькими выходными откликами, особенно в случае с почвой.

ВЫВОДЫ

1. Почвенно-грунтовые факторы коррозии стальных подземных трубопроводов образуют целый комплекс воздействий, имеющих различный результирующий эффект в зависимости от конкретных условий, что в первую очередь обусловлено чрезвычайной сложностью и изменчивостью самой почвенно-грунтовой среды. Актуальные исследования демонстрируют различные методы к группировке и акцентированию влияющих факторов коррозии, в этой связи необходима разработка подхода к выделению ключевых параметров, определяющих течение коррозионных процессов.

2. Наибольшее внимание современных исследователей уделяется таким факторам коррозии, как влажность, аэрация, электрическое сопротивление и водородный показатель (pH) почвы, присутствие хлор-ионов. Важными аспектами являются образование на поверхности металла продуктов коррозии и влияние осадочных отложений на характер коррозии и ее скорость. Необходимо рассмотрение целесообразности совместного учета электрохимических и микробиологических коррозионных процессов, поскольку имеющиеся данные говорят о возможном взаимном усилении указанных процессов.

3. Воссоздать все возможные варианты комбинаций влияющих факторов, встречающиеся при реальной эксплуатации подземных трубопроводных сетей, в натуральных либо лабораторных условиях практически невозможно и экономически нецелесообразно, в связи с чем возникает необходимость в применении новых, современных методов моделирования с использованием цифровых вычислительных средств.

4. Наиболее перспективным в этой связи представляется разработка адекватной физической модели и на ее базе использование:

– универсальных программных сред, таких как SolidWorks Simulation и ANSYS, включающих в себя большое количество специализированных модулей и надстроек для решения различных научных и инженерных задач, в том числе нестандартных;

– методов и технологий нейронных сетей (artificial neural network, ANN), представляющих широкие возможности в области предиктивной аналитики.

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.
2. 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.
3. Федорченко, В. И. Коррозия металлов: учеб. пособие / В. И. Федорченко. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009. 127 с.
4. Кулиев, С. И. Физико-химические основы коррозионных процессов: учеб. пособие / С. И. Кулиев, И. С. Борисевич. Витебск: Изд-во ВГУ им. П. М. Машерова, 2002. 71 с.
5. Новгородцева, О. Н. Коррозия металлов и методы защиты от коррозии: учеб. пособие / О. Н. Новгородцева, Н. А. Рогожников. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. 162 с.
6. Перельгин, Ю. П. Коррозия и защита металлов от коррозии: учеб. пособие / Ю. П. Перельгин, И. С. Лось, С. Ю. Киреев. Пенза: Изд-во ПГУ, 2015. 88 с.
7. Маскаленко, С. С. Особенности коррозии магистральных трубопроводов под действием почв и грунтов / С. С. Маскаленко, Е. С. Куликова // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. Хабаровск: Дальневосточ. гос. ун-т путей сообщения, 2018. Т. 1. С. 400–404.
8. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава: ГОСТ 12536–2014. Взамен ГОСТ 12536–79; 01.07.2015. М.: Стандартинформ, 2015. 18 с.
9. Statistical Soil Characterization of an Underground Corroded Pipeline Using In-Line Inspections / R. Amaya-Gómez, E. Bastidas-Arteaga, F. Muñoz, M. Sánchez-Silva // Metals. 2021. Vol. 11, No 2. P. 292–314. <https://doi.org/10.3390/met11020292>.
10. Hamilton, W. A. Sulphate-reducing Bacteria and Anaerobic Corrosion / W. A. Hamilton // Annu. Rev. Microbiol. 1985. Vol. 39. P. 195–217. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.39.100185.001211>.
11. Factors influencing corrosion of metal pipes in soils / M. Wasim, S. Shoaib, N. Mubarak, Inamuddin, A. Asiri // Environ. Chem. Lett. 2018. Vol. 16. P. 861–879. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0731-x>.
12. Methods to Evaluate Corrosion in Buried Steel Structures: A Review / L. Arriba-Rodriguez, J. Villanueva-Balsera, F. Ortega-Fernandez, F. Rodriguez-Perez // Metals. 2018. Vol. 8, No 5. P. 334–355. <https://doi.org/10.3390/met8050334>.
13. Coupled electro-Chemical-Soil Model to Evaluate the Influence of Soil Aeration on Underground Metal Pipe Corrosion / R. M. Azoor, R. N. Deo, N. Birbilis, J. K. Kodikara // Corrosion. 2018. Vol. 74, No 11. P. 1177–1191. <https://doi.org/10.5006/2860>.
14. Cole, I. S. The Science of Pipe Corrosion: a Review of the Literature on the Corrosion of Ferrous Metals in Soils / I. S. Cole, D. Marney // Corrosion Science. 2012. Vol. 56. P. 5–16. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.12.001>.
15. Azoor, R. Modelling and Testing of Optimum Soil Moisture Levels in the Corrosion of Underground Pipelines / R. Azoor, R. Deo, J. Kodikara // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 92. P. 16002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199216002>.

16. Corrosion Behavior and Mechanism of X80 Steel in Silty Soil under the Combined Effect of Salt and Temperature / X. Bai, B. He, P. Han [et al.] // RSC Advances. 2022. Vol. 12, No 1. P. 129–147. <https://doi.org/10.1039/d1ra08249c>.
17. Corrosion of API 5L X60 Pipeline Steel in Soil and Surface Defects Detection by Ultrasonic Analysis / F. Benkhedda, I. Bensaid, A. Benmoussat [et al.] // Metals. 2024. Vol. 14, No 4. P. 388. <https://doi.org/10.3390/met14040388>.
18. Electrochemical Corrosion Behaviour of Four Low-Carbon Steels in Saline Soil / G. Qi, X. Qin, J. Xie [et al.] // RSC Advances. 2022. Vol. 12, No 32. P. 20929–20945. <https://doi.org/10.1039/d2ra03200g>.
19. The Mutual Influence Between Corrosion and the Surrounding Soil Microbial Communities of Buried Petroleum Pipelines / H. Su, S. Mi, X. Peng, Y. Han // RSC Advances. 2019. Vol. 9, No 33. P. 18930–18940. <https://doi.org/10.1039/c9ra03386f>.
20. Cervová, J. The Effect of Soil Environment on the Corrosion of Pipeline / J. Cervová, M. Hagarová // Acta Metallurgica Slovaca. 2015. Vol. 21, No 2. P. 102–110. <https://doi.org/10.12776/ams.v21i2.566>.
21. Lin, C. Multi-Phase-Field Modeling of Localized Corrosion Involving Galvanic Pitting and Mechano-Electrochemical Coupling / C. Lin, H. Ruan // Corrosion Science. 2020. Vol. 177. Art. 108900. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108900>.
22. Моделирование процесса коррозионного растрескивания подземных трубопроводов / С. Н. Кутепов, А. Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев [и др.] // Чебышевский сборник. 2021. Т. 22, No 5. С. 374–383. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2021-22-5-374-383>.
23. Yegorchenko, R. Modeling the Corrosive Destruction of Underground Degassing Pipelines / R. Yegorchenko, A. Yavorskyi, P. Dyachkov // Mining Machines. 2024. No 4. P. 220–230.
24. Овчинников, И. Г. Применение программного комплекса ANSYS к расчету толстостенного трубопровода, подвергающегося высокотемпературной локальной водородной коррозии / И. Г. Овчинников, С. А. Бубнов // Известия Саратовского университета. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2011. Т. 11, № 3–2. С. 100–102. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2011-11-3-2-100-102>.
25. Predicting Pipeline Corrosion in Heterogeneous Soils Using Numerical Modelling and Artificial Neural Networks / R. Azoor, R. Deo, B. Shannon [et al.] // Acta Geotechnica. 2021. Vol. 17, No 4. P. 1463–1476. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01385-5>.
26. Chung, N. T. Comparison of Response Surface Methodologies and Artificial Neural Network Approaches to Predict the Corrosion Rate of Carbon Steel in Soil / N. T. Chung, S. R. Choi, J. G. Kim // Journal of The Electrochemical Society. 2022. Vol. 169, No 5. P. 51503. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac700d>.

Поступила 27.12.2024 Подписана в печать 26.02.2025 Опубликовано онлайн 30.05.2025

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. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-257-267> (in Russian).
2. Okolelova A. A., Zheltobryukhov V. F., Egorova G. S. (2017) *Ecological Soil Science and the Laws of Ecology*. Volgograd, VSAU-VolgSTU. 216 (in Russian).
3. Fedorchenko V. I. (2009) *Corrosion of Metals*. Orenburg, Orenburg State University. 127 (in Russian).
4. Kuliyeв S. I., Borisevich I. S. (2002) *Physico-chemical Fundamentals of Corrosion Processes*. Vitebsk, Publishing House of VSU Named after P. M. Masherov. 71 (in Russian).
5. Novgorodtseva O. N., Rogozhnikov N. A. (2019) *Corrosion of Metals and Methods of Corrosion Protection*. Novosibirsk, NSTU Publishing House. 162 (in Russian).
6. Perelygin Yu. P., Los' I. S., Kireev S. Yu. (2015) *Corrosion and Corrosion Protection of Metals*. Penza, PSU Publishing House. 88 (in Russian).
7. Maskalenko S. S., Kulikova E. S. (2018) Features of Corrosion of Main Pipelines under the Influence of Land and Soils. *Scientific, Technical and Economic Cooperation of the Countries of Asia-Pacific Region in the 21st Century*. Vol. 1. Khabarovsk, Far Eastern State Transport University, 400–404 (in Russian).

8. State Standard 12536-2014. *Soils. Methods of Laboratory Determination of Granulometric (Grain) and Microaggregate Composition*. Moscow, Standartinform, 2015. 18 (in Russian).
9. Amaya-Gómez R., Bastidas-Arteaga, E., Muñoz F., Sánchez-Silva M. (2021) Statistical Soil Characterization of an Underground Corroded Pipeline Using In-Line Inspections. *Metals*, 11 (2), 292. <https://doi.org/10.3390/met11020292>.
10. Hamilton W. A. (1985) Sulphate-reducing Bacteria and Anaerobic Corrosion. *Annual Review of Microbiology*, 39 (1), 195–217. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.39.100185.001211>.
11. Wasim M., Shoaib S., Mubarak N. M., Asiri A. M. (2018) Factors Influencing Corrosion of Metal Pipes in Soils. *Environmental Chemistry Letters*, 16 (3), 861–879. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0731-x>.
12. Arriba-Rodriguez L.-D., Villanueva-Balsera J., Ortega-Fernandez F., Rodriguez-Perez F. (2018) Methods to Evaluate Corrosion in Buried Steel Structures: A Review. *Metals*, 8 (5), 334–355. <https://doi.org/10.3390/met8050334>.
13. Azoor R. M., Deo R. N., Birbilis N., Kodikara J. K. (2018) Coupled Electro-Chemical-Soil Model to Evaluate the Influence of Soil Aeration on Underground Metal Pipe Corrosion, *Corrosion*, 74 (11), 1177–1191. <https://doi.org/10.5006/2860>.
14. Cole I. S., Marney D. (2012) The Science of Pipe Corrosion: A Review of the Literature on the Corrosion of Ferrous Metals in Soils. *Corrosion Science*, 56, 5–16. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.12.001>.
15. Azoor R., Deo R., Kodikara J. (2019) Modelling and Testing of Optimum Soil Moisture Levels in the Corrosion of Underground Pipelines. *E3S Web of Conferences*, 92, 16002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199216002>.
16. Bai X., He B., Han P., Xie R., Sun F., Chen Z., Wang Y., Liu X. (2022) Corrosion Behavior and Mechanism of X80 Steel in Silty Soil under the Combined Effect of Salt and Temperature. *RSC Advances*, 12 (1), 129–147. <https://doi.org/10.1039/d1ra08249c>.
17. Benkhedda F., Bensaid I., Benmoussat A., Benmansour S. A., Amara Zenati A. (2024) Corrosion of API 5L X60 Pipeline Steel in Soil and Surface Defects Detection by Ultrasonic Analysis. *Metals*, 14 (4), 388. <https://doi.org/10.3390/met14040388>.
18. Qi G., Qin G., Qin X., Xie J., Han P., He B. (2022) Electrochemical Corrosion Behaviour of Four Low-carbon Steels in Saline Soil. *RSC Advances*, 12 (32), 20929–20945. <https://doi.org/10.1039/d2ra03200g>.
19. Su H., Mi S., Peng X., Han Y. (2019) The Mutual Influence Between Corrosion and the Surrounding Soil Microbial Communities of Buried Petroleum Pipelines. *RSC Advances*, 9 (33), 18930–18940. <https://doi.org/10.1039/c9ra03386f>.
20. Cervová J., Hagarova M. (2015) The Effect of Soil Environment on The Corrosion of Pipeline. *Acta Metallurgica Slovaca*, 21 (2), 102–110. <https://doi.org/10.12776/ams.v21i2.566>.
21. Lin C., Ruan H. (2020) Multi-Phase-Field Modeling of Localized Corrosion Involving Galvanic Pitting and Mechano-Electrochemical Coupling. *Corrosion Science*, 177, 108900. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108900>.
22. Kutepov S. N., Sergeev A. N., Gvozdev A. E., Chukanov A. N., Tereshin V. A., Kuzovleva O. V., Tsoi E. V., Krupitsyn E. S. (2021) Modeling of the Process of Corrosion Cracking of Underground Pipelines. *Chebyshevskii Sbornik*, 22 (5), 374–383. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2021-22-5-374-383> (in Russian).
23. Yegorchenko R., Yavorskyi A., Dyachkov P., Yegorchenko R. (2024) Modeling the Corrosive Destruction of Underground Degassing Pipelines. *Mining Machines*, 41 (4), 220–230.
24. Ovchinnikov I. G., Bubnov S. A. (2011) Application of Program Complex ANSYS to Calculation of the Thick-walled Pipeline which Is Exposed to High-temperature Local Hydrogen Corrosion. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 11 (3), 100–102. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2011-11-3-2-100-102> (in Russian).
25. Azoor R., Deo R., Shannon B., Fu G., Ji J., Kodikara J. (2022) Predicting Pipeline Corrosion in Heterogeneous Soils Using Numerical Modelling and Artificial Neural Networks. *Acta Geotechnica*, 17 (4), 1463–1476. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01385-5>.
26. Nguyen T. Ch., Choi S.-R., Kim J.-G. (2022) Comparison of Response Surface Methodologies and Artificial Neural Network Approaches to Predict the Corrosion Rate of Carbon Steel in Soil. *Journal of the Electrochemical Society*, 169 (5), 051503. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac700d>.