

тоннели и станции с помощью механических систем вентиляции. От тоннельной вентиляции в большой степени зависит температурный режим на пассажирских платформах станций.

Таким образом необходимо правильно и точно рассчитывать воздухообмен тоннельной вентиляции для теплого и холодного периодов года. Для корректного выполнения данной задачи необходимо более подробно изучить процесс теплопереноса из тоннеля в грунт и обратно.

Литература

1. Цодиков, В. Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов / В. Я. Цодиков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1975. – 568 с.
2. Сухов В. В. Формирование параметров микроклимата в подземных пешеходных переходах: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Сухов Вячеслав Васильевич. – Н. Новгород, 2009. – 194 с.
3. Белениник, О. И. Структура и виды ограждающих конструкций тоннелей Минского метрополитена и их теплофизические характеристики / О. И. Белениник, Д. А. Кононов, В. Д. Сизов // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы международной научно-технической конференции, Минск, 17–18 окт. 2024 г. / редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2024. – С. 78–84.
4. Красюк, А. М. Вентиляция метрополитенов / А. М. Красюк, И. В. Лугин. – Новосибирск : Наука, 2019. – 316 с.

УДК 622.691.4: УДК 620.193.01

Почвенно-грунтовые факторы процесса коррозии стального подземного трубопровода

Романюк В. Н.¹, Струцкий Н. В.², Свистун А. Л.¹

¹Белорусский национальный технический университет,

²Государственное предприятие «НИИ Белгипрогаз»

Минск, Республика Беларусь

Почвенная среда создает условия, наиболее благоприятные для электрохимической коррозии. Электрохимическая коррозия возникает в результате взаимодействия металла газопровода, который выполняет роль электродов, с агрессивной средой грунта, выполняющей роль электролита. Металл газопровода испускает в грунт свои положительно заряженные ионы, в результате чего металл приобретает отрицательный потенциал.

В силу физико-химической неоднородности металла и грунта, где протекает процесс растворения металла, по длине газопровода располагаются участки, характеризующиеся большей или меньшей упругостью растворения. Первые становятся анодными зонами, а вторые катодными. Катодный участок газопровода приобретает положительный потенциал по отношению к аноду. Электроны перетекают от анода к катоду по металлу газопровода. В грунте происходит перемещение ионов: катионов (заряженных положительно) к катоду, а анионов (заряженных отрицательно) к аноду. Металл корродирует на участках в анодных зонах, так как в них наблюдается выход ионов металла в грунт.

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

Если механизм почвенной коррозии определяется электрохимической гетерогенностью (неоднородностью) на границе раздела «металл-внешняя 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 и усложняет задачу их изучения и анализа [16; 17].

На основании информации из зарубежных и отечественных источников ниже в табл. 1 приведены диапазоны изменения перечисленных факторов с указанием авторов источников и механизмов влияния данных факторов на протекание почвенной коррозии.

Традиционно к влияющим на протекание подземной коррозии стальных трубопроводов относят следующие основные факторы: структура грунта; влажность грунта; температура грунта; солевой состав грунтового электролита (в первую очередь, концентрация хлоридов и сульфатов); водородный показатель (рН); воздухопроницаемость, аэрация (содержание кислорода); газовый состав грунта (в первую очередь, содержание углекислого газа); электропроводность грунта; микробиологический состав (наличие сульфатвосстанавливающих бактерий, аэробных серобактерий).

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.

Перечислим некоторые взаимосвязи факторов:

– влажность ↔ гранулометрический состав: глина удерживает воду, усиливая коррозию;

– рН ↔ Cl⁻: кислые почвы с высоким содержанием Cl⁻ наиболее агрессивны;

– аэрация ↔ бактерии: низкая аэрация активирует сульфатредуцирующие бактерии.

– удельное сопротивление ↔ солевой состав: высокие концентрации солей снижают сопротивление.

Таблица 1

Основные факторы, влияющие на протекание почвенной коррозии

Параметр	Диапазон изменения фактора	Автор(ы) и источники	Примечание
Температура, °С	1–18 °С	Wasim et al., 2018 [1]; Маскаленко С. С. и др. [2]; Benkhedda F. et al. 2024 [3]; Chung N. T. et al. 2022 [4]; Qi G. et al. 2022[13] [5].	Ускорение коррозии при повышении температуры
Влажность, %	5–95 %	Маскаленко С. С. и др. [2]; Azoor R. et al. 2019 [7], 2018 [6], 2021 [8]	Максимальная коррозия при 30–70%
Удельное сопротивление, Ом·см	100–10000 Ом·см	Маскаленко С. С. и др. [2]; Cervová J. и др. 2015 [9]; Azoor R. et al. 2018 [6], 2021 [8]	< 1000 Ом·см – высокая агрессивность
Кислотность рН /	3,5–9,5	Cervová J. и др. 2015 [9]; Yegorchenko R. et al. 2023 [10]; Amaya-Gómez R. et al. 2021 [11]; Benkhedda F. et al. 2024 [3]; Chung N. T. et al. 2022 [4]	Критичен рН < 5 (кислые почвы) и > 8 (щелочные с высоким содержанием солей)
Бактериальная активность (сульфатредуцирующие бактерии)	0–10 ⁶ КОЕ/г	Маскаленко С. С. и др. [2]; Cervová J. и др. 2015 [9]; Su H. et al. 2019 [12]	Активны при рН 6–8 и низкой аэрации
Хлориды (Cl ⁻)	0–10 000 мг/кг	Cervová J. и др. 2015 [9]; Yegorchenko R. et al. 2023 [10]; Chung N. T. et al. 2022 [4]; Qi G. et al. 2022 [13]	Концентрации >500 мг/кг считаются опасными
Сульфаты (SO ₄ ²⁻)	0–10 ⁴ мг/кг	Cervová J. и др. 2015 [9]; Yegorchenko R. et al. 2023 [10]; Su H. et al. 2019; Qi G. et al. 2022 [13].	Влияют совместно с бактериями
Аэрация	0–21 % (объемная доля О ₂)	Cervová J. и др. 2015 [9]; Azoor R. et al. 2019 [7], 2021 [8].	Высокая аэрация усиливает катодные реакции.

Исходя из этого, все перечисленные выше факторы как правило не учитываются в факторной модели, и важным аспектом становится подходы, применяемые различными исследователями к структурированию и группировке факторов, выявлению их взаимосвязей, выделению ключевых параметров, определяющих итоговое воздействие почвенно-грунтовой среды на коррозионные процессы. Тогда тип почвы может определяться сочетанием некоторых ключевых параметров. Например, агрессивной почвой будет считаться почва с высокой влажностью (60–80 %), низким pH (4–5), высокими концентрации Cl^- ($> 1000 \text{ мг/кг}$), содержанием глины $> 50 \%$, наличием сульфатредуцирующих бактерий ($> 10^3 \text{ КОЕ/г}$).

Подходы к моделированию процесса почвенной коррозии с перечислением программных комплексов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Подходы к моделированию процесса почвенной коррозии
с перечислением программных комплексов

Программ- ный ком- плекс	Авторы	Год	Описание подхода к моделированию
1	2	3	4
COMSOL Multiphysics 5.6, Solid- Works (геометрия)	Yegorchenko R. [10]	2023	Моделирование процесса питтинговой коррозии и механико-электрохимического взаимодействия стальных дегазационных трубопроводов под землей
COMSOL Multiphysics® 5.3	Azoor R. M. [6]	2018	Конечно-элементное моделирование, связывающее электрохимию коррозии (реакции, поляризация, распределение потенциала) и гидрологию почвы (удержание влаги, диффузия кислорода)
COMSOL Multiphysics 5.6 (Corrosion Module)	Кутепов С. Н. [14]	2021	Моделирование процесса коррозионного растрескивания подземных трубопроводов. Используется МКЭ, модель пластичности при малых деформациях, критерий течения фон Мизеса, выражения Тафеля для электрохимических реакций (растворение железа, выделение водорода)
ANSYS	Овчинников И. Г., Бубнов С. А. [15]	2011	Метод конечных элементов (МКЭ). Моделирование нестационарной задачи теплопроводности для определения поля температур, затем решение структурной задачи для расчета напряженно-деформированного состояния толстостенного трубопровода с учетом изменения механических свойств из-за водородной коррозии (описывается параметром химического взаимодействия μ)

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).

Нейросетевое моделирование – мощный инструмент для анализа и прогнозирования сложного процесса почвенной коррозии, способствующий повышению надежности трубопроводных систем.

Нейросети моделируют сложные взаимосвязи между факторами (рН, влажность, Cl^- , SO_4^{2-} , температура, свойства трубы и т. д.), способны работать с большими данными (эффективно обрабатывают большие объемы диагностической и мониторинговой информации), могут дообучаться при поступлении новых данных, показывают лучшие результаты по сравнению с некоторыми статистическими и экспертными методами.

Выводы

1. Почвенно-грунтовые факторы образуют сложный комплекс воздействий, определяющий коррозию стальных трубопроводов.
2. Ключевыми параметрами являются влажность, аэрация, УЭС, рН, хлор-ионы, микробиологическая активность.
3. Современные методы компьютерного моделирования (МКЭ, ИНС) предоставляют широкие возможности для анализа, прогнозирования и понимания этих процессов.
4. Нейросетевое моделирование – мощный инструмент для анализа и прогнозирования сложного процесса почвенной коррозии, способствующий повышению надежности трубопроводных систем.
5. Применение моделирования необходимо для повышения надежности и долговечности подземных трубопроводов.

Литература

1. Factors influencing corrosion of metal pipes in soils / M. Wasim, S. Shoaib, N. Mubarak [et al.] // *Environ. Chem. Lett.* – 2018. – Vol. 16. – P. 861–879.
2. Маскаленко, С. С. Особенности коррозии магистральных трубопроводов под действием почв и грунтов / С. С. Маскаленко, Е. С. Куликова Е. С. // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2018. – Т. 1. – С. 400–404.
3. Benkhedda, F. Corrosion of API 5L X60 Pipeline Steel in Soil and Surface Defects Detection by Ultrasonic Analysis / F. Benkhedda // *Metals.* – 2024. – Vol. 14, № 4. – P. 388.

4. 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, № 5. – P. 51503.
5. Qi, G. Electrochemical corrosion behaviour of four low-carbon steels in saline soil / G. Qi // *RSC Advances*. – 2022. – Vol. 12, № 32. – P. 20929–20945.
6. Azoor R. M. Coupled electro-chemical-soil model to evaluate the influence of soil aeration on underground metal pipe corrosion / R. M. Azoor // *Corrosion*. – 2018. – Vol. 74, № 11. – P. 1177– 1191.
7. 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. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/18/e3sconf_isg2019_16002/e3sconf_isg2019_16002.html (дата обращения: 15.03.2025).
8. Predicting pipeline corrosion in heterogeneous soils using numerical modelling and artificial neural networks / R. Azoo, R. N. Deo, B. Shannon [et al.] // *Acta Geotechnica*. – 2021. – Vol. 17, № 4. – P. 1463–1476.
9. Cervová, J. The effect of soil environment on the corrosion of pipeline / J. Cervová, M. Hagarová // *Acta Metallurgica Slovaca*. – 2015. – Vol. 21, № 2. – P. 102–110.
10. Yegorchenko, R. Modeling the corrosive destruction of underground degassing pipelines / R. Yegorchenko, A. Yavorskyi, P. Dyachkov // *Mining Machines*. – 2024. – № 4. – P. 220–230.
11. Amaya-Gómez, R. Statistical Soil Characterization of an Underground Corroded Pipeline Using In-Line Inspections/ R. Amaya-Gómez // *Metals*. – 2021. – Vol. 11, № 2. – P. 292–314.
12. The mutual influence between corrosion and the surrounding soil microbial communities of buried petroleum pipelines / H. Su, S. Mi, X. Peng [et al.] // *RSC Advances*. – 2019. – Vol. 9, № 33. – P. 18930–18940.
13. Electrochemical corrosion behaviour of four low-carbon steels in saline soil / G. Qi, X. Qin, J. Xie [et al.] // *RSC Advances*. – 2022. – Vol. 12, № 32. – P. 20929–20945.
14. Моделирование процесса коррозионного растрескивания подземных трубопроводов / С. Н. Кутепов, А. Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев [и др.] // *Чебышевский сборник*. – 2021. Т. 22, № 5 (81). – С. 372–381.
15. 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. Новая серия. Серия : Математика. Механика. Информатика*. – 2011. – Т. 11, № 3–2. – С. 100–102.

16. Струцкий, Н. В. Организация электрохимической защиты стальных подземных трубопроводов от коррозии в газораспределительной отрасли Республики Беларусь / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2024. – Т. 67, № 3. – С. 257–267.

17. Окоелова, А. А. Экологическое почвоведение и законы экологии: учебное пособие / А. А. Окоелова, В. Ф. Желтобрюхов, Г. С. Егорова. = Волгоград ; ВГАУ-ВолгГТУ, 2017. – 216 с.

УДК 620.98

Моделирование влияния роста доли местных возобновляемых ТЭР на себестоимость производства тепловой энергии

Любчик О. А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В работе рассматривается оптимизация структуры производства тепловой энергии в Республике Беларусь с целью снижения себестоимости, включая увеличение доли местных горючих возобновляемых источников энергии. Целевой функцией является минимум совокупных системных затрат при соблюдении ряда ограничений. Результаты моделирования показывают, что интеграция повышение доли местных возобновляемых топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) позволяет снизить себестоимость производства тепловой энергии.

Снижение затрат на производство электрической и тепловой энергии остается одной из ключевых задач развития энергетического сектора. Достижение этой цели обеспечивается посредством комплекса мероприятий, в том числе, благодаря оптимизации структуры производства энергии.

В качестве основы моделирования была принята концепция энергетических цепочек, отражающих движение энергетических потоков от добычи и импорта энергоресурсов через этапы преобразования энергии, транспортировки и распределения до конечного потребителя [1, с. 5–6; 2, с. 6–7]. Такой подход позволяет комплексно оценивать эффективность проводимой энергетической политики, анализировать и оптимизировать сценарии развития энергетического сектора и модернизации энергосистемы [3; 4; 5, с. 127–131]. Из модели исключены процессы импорта и экспорта электроэнергии. Ключевым принципом построения модели является оптимизация целевой функции при наличии системы ограничений, определяющих допу-