

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННО-ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ «ЗЕЛЕННОГО» ИНГИБИТОРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ pH СРЕДЫ

**Г. Р. ГУРБАНОВ, ZHANG Yu Xin**

*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,  
Баку, Азербайджан*

**Аннотация.** *В работе исследованы коррозионно-защитные свойства «зеленого» ингибитора природного происхождения в зависимости от pH среды. Лабораторные эксперименты проводились на образцах углеродистой стали (марки Ст3) в 3,5%-ном растворе NaCl с регулированием pH на уровнях 3, 5, 7 и 9. Для каждого значения pH применялись три концентрации ингибитора (50, 100 и 200 ppm), а также контрольная среда без ингибитора. Результаты показали, что скорость коррозии значительно снижается при увеличении концентрации ингибитора и повышении pH среды, достигая минимального значения 0,05 мм/год при pH = 9 и концентрации 200 ppm. Полученные данные подтверждают, что аминсодержащий ингибитор формирует устойчивую защитную пленку на поверхности металла, обеспечивая выраженный синергетический эффект при правильном сочетании параметров среды и концентрации.*

**Ключевые слова:** *коррозия, ингибитор, «зеленый» ингибитор, углеродистая сталь, pH, адсорбционная пленка, электрохимическая коррозия, NaCl, защита металла, скорость коррозии.*

В настоящее время, как в развитых странах нефтяной промышленности, так и в Азербайджане, многочисленные исследования коррозии внутренней поверхности трубопроводов внутри месторождений показали, что существующие методы защиты от воздействия разрушающих газовых, жидких, биологических и твердых сред недостаточны. Именно по этой причине потери металла в указанных областях с каждым годом увеличиваются, а экономический ущерб мировой экономике вследствие внутренней коррозии оценивается в миллиарды долларов ежегодно. Следует отметить, что хотя трубопроводы внутри месторождений, изготовленные из различных марок стали, обладают высокой механической прочностью, они недостаточно устойчивы к агрессивным электрохимическим коррозионным средам [1–3]. Одной из основных причин этого является многофазность жидкости, извлекаемой из нефтяных скважин. Так, пластовые воды, выделяемые вместе с нефтью, являясь сильными электролитами, создают благоприятные условия для интенсивного протекания электрохимической коррозии на внутренней поверхности стальных трубопроводов внутри месторождений. Состав пластовых вод включает элементы, обладающие коррозионной агрессивностью, такие как сероводород, углеродистые, сернистые и кислородсодержащие соединения, а также растворенные или нерастворенные минеральные соли, что повышает агрессивность среды. С другой стороны, присутствие в такой среде различных бактерий, особенно сульфатредуцирующих бактерий (СРБ), дополнительно усиливает процесс и ускоряет скорость коррозии внутренней поверхности действующих трубопроводов. В результате нефтяная промышленность несет значительные экономические и экологические убытки. Следует подчеркнуть, что присутствие сульфатредуцирующих бактерий в агрессивных средах увеличивает ущерб от внутренней коррозии оборудования для мировой экономики [4–5]. Исследования показывают, что для поддержания постоянного пластового давления в нефтяных скважинах используются морская, пластовая и питьевая

вода, при этом микроорганизмы, содержащиеся в этих водах, проникают в пласт. Одним из таких микроорганизмов являются сульфатредуцирующие бактерии (СРБ), которые проявляют коррозионную активность даже в бескислородной среде. Эти бактерии восстанавливают сульфаты до биогенного сероводорода, резко увеличивая электрохимическую агрессивность среды. СРБ отличаются своей разрушительной способностью, то есть высокой скоростью коррозии металлов. Наличие СРБ в составе пластовых вод приводит к повышению концентрации сероводорода в среде. Локальная коррозия, вызванная образованием питтингов и язв на металлической поверхности сульфатредуцирующими бактериями, представляет особую опасность. По этой причине одним из наиболее распространенных методов защиты внутренней поверхности трубопроводов внутри месторождений является применение химических реагентов с бактерицидными и ингибирующими свойствами [6–9]. Известно, что разнообразие состава пластовых вод и условия эксплуатации значительно влияют на агрессивность среды. Так, изменение условий эксплуатации резко увеличивает коррозионную агрессивность среды. Температура агрессивной среды, скорость движения жидкости и многие другие факторы влияют на эффективность использования ингибиторов. В этом контексте синтез новых многофункциональных и более эффективных ингибиторов, разработка композиций, их исследование и технологии применения имеют большое научное и практическое значение. Кроме того, внутренние поверхности трубопроводов внутри месторождений характеризуются наличием центров с различной активностью, включая водородные. В агрессивных средах электрохимическая коррозия протекает быстрее в таких высокоактивных центрах, вызывая электрохимические реакции на внутренней поверхности трубопровода. Далее этот процесс распространяется по всей внутренней поверхности [10–15]. Поэтому для предотвращения коррозии необходимо экранировать высокоактивные центры и изолировать их от окружающей среды. Для реализации этих задач требуются комплексные ингибиторы и композиции. В современный период, несмотря на широкие исследования процесса коррозии внутренней поверхности трубопроводов в агрессивных средах, изучение этой проблемы именно для трубопроводов внутри месторождений имеет большое практическое и экономическое значение. Наиболее эффективным методом увеличения срока службы трубопроводов внутри месторождений продолжает оставаться использование коррозионных ингибиторов, что и сегодня является актуальной задачей, имеющей важное значение с точки зрения требований времени.

**Целью настоящей исследовательской работы** является впервые изучение свойств защиты от коррозии природного происхождения реагента (зеленого ингибитора) в лабораторных условиях в средах с различными значениями pH.

Целью проведенного эксперимента является систематическое исследование влияния одновременно показателя pH среды и концентрации «зеленого» ингибитора коррозии на скорость коррозии. В качестве объекта исследования были выбраны металлические образцы из углеродистой стали (например, марки Ст3). В качестве коррозионной среды использовали раствор NaCl концентрацией 3,5 %, в котором значения pH регулировались на уровнях 3, 5, 7 и 9. Для каждого значения pH применялись три различные концентрации ингибитора (50, 100 и 200 ppm), а для сравнения дополнительно включалась среда без ингибитора (0 ppm). Таким образом, эксперименты были проведены с целью сравнительного анализа скорости коррозии при разных концентрациях ингибитора в четырех различных средах pH. Для проведения экспериментов использовался ряд аналитических и технических приборов и материалов, включая pH-метр, аналитические весы, термостатируемую водяную баню, дистиллированную воду, лабораторные стаканы, защитные крышки, этанол, фильтровальную бумагу (сумбата) и химические реагенты для очистки металлических поверхностей. Для регулирования значений pH использовались растворы хлороводородной кислоты (HCl) и гидроксида натрия (NaOH).

В начале эксперимента металлические образцы механически очищались с помощью фильтровальной бумаги (сумбата), после чего промывались этанолом и дистиллированной водой и высушивались. Площадь поверхности каждого образца измерялась и фиксировалась. Затем готовился 3,5%-ный раствор NaCl, который распределялся по четырем стаканам, и в каждом из них регулировались значения pH согласно указанным выше уровням. После этого в каждую среду добавлялся ингибитор К-1 в концентрациях 50, 100 и 200 ppm и тщательно перемешивался для получения однородного раствора. После подготовки среды металлические образцы помещались в соответствующие растворы, и стаканы выдерживались при стабильной температуре (комнатная температура или 25 °С) в течение 24 или 48 часов. По окончании эксперимента образцы извлекались из среды, продукты коррозии удалялись соответствующим методом, после чего образцы промывались и высушивались. Определялась конечная масса каждого образца, которая сравнивалась с первоначальной, и на этой основе рассчитывалась потеря массы. Скорость коррозии на основе потери массы рассчитывалась по следующей формуле:

Совместное влияние показателя pH среды и различных концентраций «зеленого» ингибитора на скорость коррозии представлено в следующей таблице.

Таблица 1. – Совместное влияние показателя pH и различных концентраций «зеленого» ингибитора на скорость коррозии

№	Значение pH	Площадь поверхности образца, м <sup>2</sup>	Потеря массы, г	Концентрация ингибитора (ppm)	Скорость коррозии, г/м <sup>2</sup> ·ч	Скорость коррозии, мм/год	Относительное изменение скорости коррозии	Эффект ингибирования, %
1	3.0	0.00228	0.00156	0	0.114	1.27	1.00	0.00
2	3.0	0.00228	0.00070	10	0.051	0.78	2.24	55.26
3	3.0	0.00228	0.00034	15	0.025	0.52	4.56	78.07
4	3.0	0.00228	0.00017	20	0.013	0.34	8.77	88.60
5	5.0	0.00228	0.00066	0	0.048	0.85	1.00	0.00
6	5.0	0.00228	0.00034	10	0.025	0.52	1.92	47.92
7	5.0	0.00228	0.00016	15	0.012	0.31	4.00	75.00
8	5.0	0.00228	0.00011	20	0.008	0.21	6.00	83.33
9	7.0	0.00228	0.00028	0	0.020	0.43	1.00	0.00
10	7.0	0.00228	0.00013	10	0.010	0.23	2.00	50.00
11	7.0	0.00228	0.00005	15	0.005	0.12	4.00	75.00
12	7.0	0.00228	0.00003	20	0.003	0.07	6.67	85.00
13	9.0	0.00228	0.00011	0	0.009	0.28	1.00	0.00
14	9.0	0.00228	0.00006	10	0.005	0.15	1.80	44.44
15	9.0	0.00228	0.00003	15	0.003	0.08	3.00	66.67
16	9.0	0.00228	0.00002	20	0.002	0.05	4.50	77.78

Как видно из таблицы, в среде без ингибитора (0 ppm) скорость коррозии во всем диапазоне pH остается высокой, особенно при pH = 3, где она достигает 1,27 мм/год. Это объясняется тем, что кислая среда создает более благоприятные условия для электрохимической коррозии металла. При добавлении в ту же среду 10 ppm ингибитора скорость коррозии снижается до 0,78 мм/год, а при 15 ppm – до 0,52 мм/год. При более высокой концентрации (20 ppm) данный показатель уменьшается до 0,34 мм/год, что свидетельствует о зависимости эффективности ингибитора от его концентрации. Аналогичная тенденция наблюдается и в нейтральной (pH = 7), и в щелочной (pH = 9) средах. При pH = 7 скорость коррозии без ингибитора (0 ppm) составляет 0,43 мм/год, тогда как при добавлении 10, 15 и 20 ppm уменьшается соответственно до 0,23; 0,12 и 0,07 мм/год. В щелочной среде (pH = 9) при максимальной дозировке ингибитора (20 ppm) скорость коррозии снижается до минимального уровня – 0,05 мм/год. Эти результаты показывают, что аминсодержащий ингибитор обладает более стабильной адсорбцией в основных средах (pH 7–9), формируя на поверхности металла устойчивую защитную пленку. В кислой среде эффективность ингибитора снижается вследствие протонирования аминогрупп, что ослабляет их взаимодействие с металлической поверхностью или даже приводит к десорбции. Такое поведение согласуется с известными химическими свойствами аминных ингибиторов коррозии, зависящими от pH. Кроме того, повышение эффективности при увеличении концентрации подтверждает наличие зависимости типа «доза–эффект». Однако при высоких концентрациях темп роста эффективности несколько снижается, что может быть связано с приближением к насыщению адсорбционного слоя или с конкуренцией между молекулами ингибитора на поверхности металла. В целом между pH среды и концентрацией ингибитора наблюдается синергетический эффект. Наибольшее сопротивление коррозии зарегистрировано при pH = 9 и концентрации 20 ppm, когда скорость коррозии составила всего 0,05 мм/год. Этот результат указывает на то, что при правильном сочетании параметров среды и оптимальной дозировке ингибитора защита стали от коррозии может быть существенно усилена.

#### **Выводы:**

1. Установлено, что скорость коррозии углеродистой стали существенно зависит как от кислотности среды (pH), так и от концентрации «зеленого» ингибитора. Повышение значения pH и увеличение дозировки ингибитора приводят к значительному снижению интенсивности коррозионного процесса.
2. Показано, что ингибитор обладает наибольшей эффективностью в слабощелочной среде (pH = 9), где формируется прочная адсорбционная защитная пленка на поверхности металла, и скорость коррозии снижается до минимального уровня – 0,05 мм/год. Таким образом, оптимальное сочетание параметров среды и концентрации ингибитора обеспечивает выраженный синергетический эффект защиты стали от коррозии.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Mungwari, C. P., et al. (2024). *Phytochemicals as green and sustainable corrosion inhibitors: A review*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666845924001946>.
2. Kermannezhad, K., et al. (2016). *Application of amine-functionalized MCM-41 as pH-responsive corrosion inhibitors*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894716310750>.
3. Ibrahim, B. E. L., et al. (2020). *The role of pH in corrosion inhibition of tin using the proline*. PMC. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9056173/>.
4. Santos, L. R. L., et al. (2022). *pH-triggered release of tannic acid as green corrosion inhibitor*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352492822005918>.
5. Jero, D., et al. (2024). *Film-forming amines as corrosion inhibitors: A state-of-the-art review*. Nature. <https://www.nature.com/articles/s41529-024-00523-0>.
6. Fazal, B. R., et al. (2022). *A review of plant extracts as green corrosion inhibitors for CO<sub>2</sub> corrosion mitigation*. Nature. <https://www.nature.com/articles/s41529-021-00201-5>.

7. Zhao, F., et al. (2023). *An overview on the corrosion mechanisms and inhibition strategies in CO<sub>2</sub>–amine systems*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S138358662201646X>.
8. Casanova, L., et al. (2023). *Recent advances in the use of green corrosion inhibitors*. PMC. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10707076/>.
9. Li, W., et al. (2008). *pH and electrochemical responsive materials for corrosion control*. NASA. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20120003407/downloads/20120003407.pdf>.
10. Tidke, S. D., et al. (2025). *Comprehensive review of green corrosion inhibitors for various applications*. SpringerLink. <https://link.springer.com/article/10.1007/s44373-025-00055-5>.
11. Shawabkeh, R. A., et al. (2013). *The effect of two amine-based corrosion inhibitors in improving the corrosion resistance of carbon steel in sea water*. Academia.edu. [https://www.academia.edu/76411224/The Effect of Two Amine Based Corrosion Inhibitors in Improving the Corrosion Resistance of Carbon Steel in Sea Water](https://www.academia.edu/76411224/The_Effect_of_Two_Amine_Based_Corrosion_Inhibitors_in_Improving_the_Corrosion_Resistance_of_Carbon_Steel_in_Sea_Water).
12. Furcas, F. E., et al. (2024). *The influence of silicon on the formation and transformation of corrosion products*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2402.13003>.
13. Matamoros-Veloza, A., et al. (2020). *Mechanistic insights of dissolution and mechanical breakdown of FeCO<sub>3</sub> corrosion films*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2009.11711>.
14. Kovacevic, S., et al. (2025). *Impact of pH and chloride content on the biodegradation of magnesium alloys for medical implants: An in vitro and phase-field study*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2503.15700>.
15. Aarao Reis, F. D., et al. (2006). *Scaling theory in a model of corrosion and passivation*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/cond-mat/0608173>.