

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА МАГИСТРАЛЬНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ: СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ПРОБЛЕМ

Ю. А. Краус¹✉, К. С. Маркелова²

¹Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

²Омский государственный университет путей сообщения,
Россия, 644046, г. Омск, пр. К. Маркса, 35

✉ omgtu.feom@yandex.ru

Аналитический обзор представляет собой комплексное и систематическое исследование научной литературы и нормативных документов, опубликованных за последние пять лет (2020–2025 гг.), посвященных критической проблеме электромагнитного влияния воздушных линий электропередачи на коррозионную надежность подземных магистральных трубопроводов.

В работе классифицируются и анализируются исследования по нескольким ключевым направлениям: фундаментальные механизмы индуктивной связи между источниками переменного тока и трубопроводными сетями; специфические явления коррозии под действием переменного тока и ее отличия от коррозии постоянным током; негативное влияние наведенных напряжений переменного тока на работоспособность и эффективность систем катодной защиты, а также развитие методов компьютерного моделирования и методологий оценки рисков для прогнозирования уровней влияния и вероятности коррозии. Определены ключевые достижения в этой области нормирования негативного влияния, включая установление пороговых значений плотности переменного тока для инициации коррозии и методы его оценки. Однако сохраняются значительные нерешенные проблемы, в частности, отсутствие универсальных, валидированных прогнозных моделей, способных точно имитировать сложные полевые условия с учетом неоднородной структуры грунтов, динамических изменений нагрузок от тяговых сетей и высоковольтных линий электропередачи, а также наличия дефектов изоляции и неравномерного износа изоляционного покрытия. Кроме того, синергетические эффекты при совместном воздействии переменного и постоянного токов в долгосрочной перспективе остаются недостаточно изученными.

На основе проведенного анализа сформулированы приоритетные направления для будущих исследований, подчеркивающие необходимость разработки интеллектуальных адаптивных систем защиты, интегрирующих мониторинг критических параметров в реальном времени, применение вероятностных риск-ориентированных подходов к управлению целостностью и использование технологий цифровых двойников для повышения эксплуатационной безопасности и коррозионной надежности объектов энерготранспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, высоковольтная линия электропередачи, индуктивное влияние, коррозия под действием переменного тока, катодная защита, наведенное напряжение, риск-ориентированный подход

Для цитирования: Краус Ю. А., Маркелова К. С. Влияние высоковольтных линий электропередачи на магистральные трубопроводы: систематизация проблем. *Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение»*. 2026. Т. 10, № 1. С. 22–32. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-1-22-32>. EDN: CTLBXO.



© Краус Ю. А., Маркелова К. С., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

INFLUENCE OF HIGH-VOLTAGE POWER LINES ON MAIN PIPELINES: SYSTEMATIZATION OF PROBLEMS

Yu. A. Kraus¹✉, K. S. Markelova²

¹Omsk State Technical University, Mira Ave., 11, Omsk, 644050, Russia

²Omsk State Transport University, K. Marks Ave., 35, Omsk, 644046, Russia

✉ omgtu.feom@yandex.ru

Analytical review provides a comprehensive and systematic examination of scientific literature and regulatory documents published over the past five years (2020–2025) addressing the critical issue of electromagnetic interference from overhead power lines on the corrosion reliability of buried main pipelines.

The paper categorizes and analyzes research across several key areas: the fundamental mechanisms of inductive coupling between alternating current sources and pipeline networks; the specific phenomena of alternating current induced corrosion and its distinction from direct current corrosion; the detrimental effects of induced alternating current voltages on the performance and effectiveness of cathodic protection systems; and the advancement of computational modeling techniques and risk assessment methodologies for predicting interference levels and corrosion likelihood. Key achievements in the field of negative impact standardization are identified, including the establishment of threshold alternating current density values for corrosion initiation and methods for its assessment. However, significant unresolved challenges persist, particularly the absence of universal, validated predictive models capable of accurately simulating complex field conditions involving heterogeneous soil structures, dynamic load variations from traction networks and high-voltage power lines, as well as the presence of coating defects and uneven deterioration of insulating coatings. Furthermore, the synergistic effects of combined alternating current and direct current interference over the long term remain insufficiently understood.

Based on the synthesized analysis, priority directions for future research are formulated, emphasizing the necessity for developing intelligent, adaptive protection systems that integrate real-time monitoring of critical parameters, employ probabilistic risk-based approaches for integrity management, and leverage digital twin technologies to enhance the operational safety and corrosion reliability of energy transportation infrastructure.

Keywords: main pipeline, high-voltage power line, inductive interference, AC corrosion, cathodic protection, induced voltage, risk-based approach

For citation: Kraus Yu. A., Markelova K. S. Influence of high-voltage power lines on main pipelines: Systematization of problems. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2026;10(1):22–32. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-1-22-32>. EDN: CTLBXO. (In Russ.).



© Kraus Yu. A., Markelova K. S., 2026.

The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

К высоковольтным источникам переменного тока относятся электрифицированные железные дороги (ЭЖД) на переменном токе и высоковольтные линии (ВЛ) электропередачи. Они могут оказывать следующее влияние [1] на смежные магистральные трубопроводы (МТ): омическое (гальваническое); емкостное (электростатическое); кондуктивное (резистивное); индуктивное (электромагнитное).

Влияние высоковольтных источников переменного тока приводит к ряду угроз:

- опасность поражения персонала электрическим током;
- выход из строя подключенного оборудования;
- мешающее влияние при строительстве и ремонте МТ;
- развитие коррозии, что влияет на надежность МТ;
- неэффективность средств электрохимической защиты (ЭХЗ);
- сложность мониторинга и моделирования.

МТ, ЭЖД и ВЛ прокладывались в общих коридорах с целью сведения к минимуму их негативно-го воздействия на окружающую среду. По данным на 2025 г. протяженность ЭЖД оценивается в более чем 44 тыс. км, из которых около 25 тыс. км работают на переменном электрическом токе. Протяженность ВЛ, по данным сетевого оператора единой энергетической системы (ЕЭС) России, составляет более 506 тыс. км. По данным приказа Минэнерго России от 30 ноября 2023 г. № 1095 «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2024–2029 гг.», в 2023 г. общая протяженность ВЛ с номинальным напряжением 220 кВ и выше составила примерно 194,3 тыс. км. Если провести сравнение с показателями 2018 г. (примерно 182,1 тыс. км), можно увидеть увеличение протяженности на 6,7 % за 5 лет, что в среднем составляет примерно 1,3 %.

Протяженность магистральных трубопроводов на территории России превышает 250 тыс. км. При этом по экспертной оценке на каждые 5–10 км трассы магистральных трубопроводов приходится

пересечение или сближение с ВЛ 110 кВ, а на каждые 20–30 км с ВЛ 220 кВ и выше. Пересечение или сближение МТ с ЭЖД приходится примерно на каждые 30–40 км.

Таким образом, актуальность темы исследования обусловлена масштабным совпадением трасс МТ, ЭЖД и ВЛ на территории России, а также их дальнейшим развитием. Все это создаёт комплексную проблему безопасности и эксплуатационной надёжности МТ.

Омическое или гальваническое влияние основано на законе Георга Ома (Закон Ома, 1827 г.) и связано с непосредственным контактом или чаще с протеканием тока в грунте. Явление стало очевидным с появлением первых рельсовых трамваев на постоянном токе в конце XIX в. Инженеры-практики первыми зафиксировали ускоренную коррозию труб и кабелей рядом с путями ЭЖД. В дальнейшем явление было названо электрокоррозией или коррозией под действием блуждающих токов (постоянный ток), за рубежом известна как DC-коррозия (DC corrosion). Здесь следует отметить вклад В. Бэкмана и В. Швенка [1], создавшие теоретическую и практическую базу, на которой выросли все современные национальные и международные стандарты, включая ISO, DIN, а впоследствии и ГОСТы. Понимание проблем блуждающих токов, детально описанных ими, стало основой для изучения более сложного явления — индуцированных переменных токов от ВЛ и ЭЖД.

Для ВЛ и ЭЖД на переменном токе также возможно стекание переменного тока в грунт через опоры или рельсовые пути. При этом с повышением напряжения контактной сети ЭЖД до 25 кВ снижается тяговый ток, а знакопеременность его ограничивает распространение по объёму земли. Кроме того, возрастает сопротивление трубопровода из-за его индуктивности, а также из-за потерь в трубопроводе и окружающем его грунте.

Емкостное и электростатическое влияние основаны на явлении электростатической индукции и понятии электрической емкости. Фундамент заложили Майкл Фарадей (закон электромагнитной индукции, 1831 г.) и Джеймс Клерк Максвелл (создал теорию электромагнитного поля, которую сформулировал в виде системы из четырёх уравнений, 1860–1865 гг.). Проявилось с появлением ВЛ переменного тока. При строительстве и ремонте изолированный надземный трубопровод вблизи ВЛ «заряжается», что создает угрозу для рабочих. Явление осознано инженерами-энергетиками в начале XX в. В то же время отмечается резкое снижение воздействия по мере удаления от ВЛ и не рассматривается как решающий фактор.

Кондуктивное или резистивное влияние также является следствием закона Ома, но для токов короткого замыкания, стекающих в землю. Методы расчета и защиты разрабатывались инженерами-электроэнергетиками в середине XX в. Кондуктивное влияние доминирует для ЭЖД. Сильное влияние может проявляться на относительно узкой, но протяжённой вдоль пути зоне, сила тока зависит от графика движения железнодорожного состава (пики при разгоне).

Индуктивное или электромагнитное влияние основано на законе электромагнитной индукции Фарадея (1831 г.) и известно с начала прошлого века из-за развития линий проводной связи. Однако активное изучение началось в 1960–1970-х гг. в связи с развитием систем газо-, нефтепроводов и энерго-

сетей, а также значительным увеличением энергетических мощностей.

Первое строгое решение задачи о сопротивлении магнитной связи или взаимной индуктивности получено в 1909 г. А. Зоммерфельдом [2]. Количественное описание для линий связи дал в 1926 г. Дж. Карсон [3], решив задачу расчёта электромагнитного поля от провода с учётом конечной проводимости земли («интегралы Карсона»). Это основа всех современных методов расчёта индуктивного влияния ВЛ на трубопроводы, рельсы и кабели связи. В это же время, независимо от Дж. Карсона, С. Поллачек разработал строгое аналитическое решение для расчёта взаимной индуктивности между параллельными проводниками, расположенными в проводящей среде (земле) [4]. Его формула учитывала конечную проводимость земли, что было критическим усовершенствованием по сравнению с более ранними моделями для воздуха. В России в 1926 г. также В. А. Фок и В. Р. Бурсиан решили в общем виде основную задачу теоретического определения электромагнитного поля провода конечной длины, расположенного на поверхности однородного полупространства [5].

Методы Дж. Карсона и С. Поллачека легли в основу всех последующих ручных и машинных расчётов индуктивного влияния ВЛ на трубопроводы, кабели связи и другие протяжённые объекты.

Пионерами в моделировании были Ф. Давалиби [6], В. И. Дмитриев, М. А. Толстая, Э. И. Иоффе, И. В. Потемкинская [7–10], И. В. Стрижевский [11].

Работы Ф. Давалиби и его коллег в 1970–1980-х гг. заложили основы компьютерного моделирования растекания токов в сложном грунте и оценки опасных потенциалов. Его методы легли в основу программного обеспечения CDEGS (Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis), используемого и сегодня.

В. И. Дмитриев [7] развил идеи В. Р. Бурсиана и В. А. Фока и создал строгий математический аппарат моделирования электромагнитных полей в неоднородных средах, альтернативный западным подходам.

М. А. Толстая, Э. И. Иоффе, И. В. Потемкинская адаптировали теорию для прикладных расчётов влияния [8–10], а также описали влияние факторов окружающей среды на коррозию подземных стальных трубопроводов под действием переменного тока [10], которая в зарубежных источниках называется АС-коррозия (AC corrosion).

И. В. Стрижевский углубил понимание кондуктивной составляющей [11].

АС-коррозия стала предметом интенсивных исследований с конца 1990-х–начала 2000-х гг. Так, фундаментальное исследование электрохимических механизмов АС-коррозии S. Goidanich и др. [12] дали ее четкое электрохимическое объяснение через фарадеевское выпрямление. Lu Yao Xu, Y. F. Cheng исследовано влияние АС-тока на эффективность катодной защиты [13]. АС-коррозия представляет особую опасность, так как может развиваться даже при формально функционирующей системе катодной защиты, приводя к скрытым повреждениям и риску аварий. Е. И. Крапивский, П. А. Яблучанский совершенствовали методику оценки электромагнитного влияния ВЛ на МТ [14], учитывая, в том числе, и угрозу АС-коррозии.

Таким образом, история вопроса — это история коллективного научно-инженерного знания. При этом электромагнитное влияние — это главная про-

блема для подземных трубопроводов в нормальном режиме работы ВЛ, для ЭЖД на переменном токе доминирующей проблемой является кондуктивное влияние.

В настоящее время основное внимание по данному вопросу посвящено созданию комплексных математических моделей для расчета всех видов влияния и формирование международных стандартов для нивелирования негативного воздействия на подземные коммуникации. Акцент влияния смещается на электромагнитное влияние, оказываемое ВЛ. Этому способствует стабильное развитие ЕЭС и большая протяженность ВЛ.

Постановка задачи

Обзор литературы показывает, что фундаментальные физические механизмы влияния (индуктивное, кондуктивное, ёмкостное) были описаны на основе законов классической электродинамики (Ом, Фарадей, Максвелл) и исследованы применительно к трубопроводам во второй половине XX в. (работы Ф. Давалиби, В. И. Дмитриева, М. А. Толстой, Э. И. Иоффе, И. В. Потемкинской, И. В. Стрижевского). Исходной гипотезой было понимание АС-коррозии как следствия фарадеевского выпрямления тока (S. Goidanich, 2010). Нормативная база активно развивается, смещая фокус с контроля потенциала на мониторинг плотности переменного тока. Объект исследования — система «ВЛ-подземный МТ» в зоне электромагнитного влияния. Постановка проблемы заключается в несоответствии классических методов оценки и защиты новым вызовам, связанным с нелинейностью процессов АС-коррозии, старением инфраструктуры и отсутствием детальной пространственной статистики пересечений.

Цель работы — систематизация современных знаний для обоснования направления перспективных исследований в области влияния ВЛ на защиту от коррозии подземных МТ и противодействия ему.

Задачи:

- 1) провести поиск и анализ релевантных научных работ и нормативных документов;
- 2) классифицировать исследования по ключевым проблемным областям;
- 3) выявить решенные и нерешенные научно-практические проблемы;
- 4) сформулировать тезисы и предложить вектор для дальнейших изысканий.

Методы и средства исследования

Для сбора информации использовался комплексный подход: поиск проводился в международных базах данных (Scopus, Web of Science), ВАК (через платформы CyberLeninka и eLibrary), а также по открытым источникам нормативной документации. Использовались ключевые слова на русском и английском языках.

Приоритет отдавался рецензируемым научным статьям, монографиям, материалам конференций и актуальным стандартам, опубликованным в период с 2020–2025 гг., а также ключевым и основополагающим трудам, изданным до 2020 г.

В качестве базовых были определены три масштабные работы последних пяти лет:

- 1) Европейский исследовательский проект «AC Corrosion and Mitigation» (ACCM) в рамках программы Horizon 2020 / Horizon Europe [15];
- 2) Проект PHMSA № 900 (Университет Акрона, 2020–2024) — комплексное вероятностное модели-

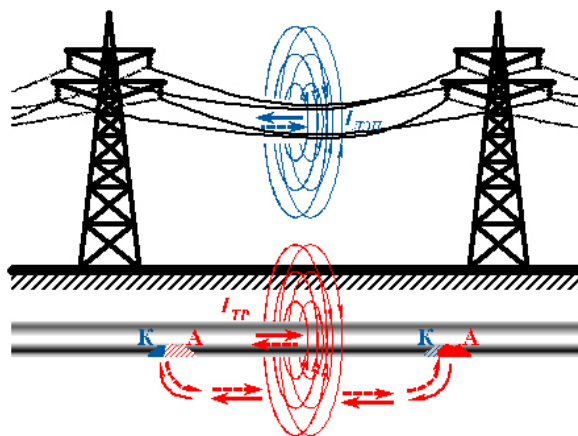


Рис. 1. Схема наведения индуцированного тока
Fig. 1. Schematic of induced current coupling

рование работы катодной защиты под влиянием наведенного переменного тока [16];

3) ГОСТ 9.922–2024 «Единая система защиты от коррозии и старения. Дополнительные рекомендации по оценке угрозы коррозионного воздействия переменного тока на стальные подземные трубопроводы» — новейший российский стандарт, устанавливающий методы оценки угрозы коррозии от переменного тока.

В результате рассмотрено более 100 источников, из которых отобрано и проанализировано 14 источников до 2020 г. и 20 источников за 2020–2025 г., признанных достоверными и соответствующих заявленным критериям.

Теория

Обобщая опыт ранее рассмотренных исследований в области электромагнитного влияния на МТ ВЛ и ЭЖД на переменном токе, а также с учетом работ [15–17], картина наведения индуцированных токов представляется следующим образом (рис. 1).

При параллельном сближении направление индуцированного тока подчиняется закону Ленца. Следовательно в упрощенной модели для двух параллельных проводников, если ток в проводе ВЛ течёт в определённом направлении (верхняя часть на рис. 1), то в ближайшей к нему части трубопровода индуцированный ток будет стремиться течь в противоположном направлении, чтобы компенсировать создаваемое ВЛ магнитное поле (нижняя часть на рис. 1). При этом ток ВЛ — переменный синусоидальный, его направление меняется 100 раз в секунду (для 50 Гц). Тогда направление индуцированного тока в трубопроводе также меняется синхронно с той же частотой (на рис. 1 смена направления показана пунктиром).

Таким образом, электромагнитное поле наводит на трубопровод продольную электродвижущую силу (ЭДС), под действием которой вдоль трубы течет переменный индуцированный ток. Но контур тока должен быть замкнут, и он замыкается через грунт на трубопровод, т. е. появляются анодные участки (на рис. 1 обозначены буквой А), с которых ток стекает в грунт, и катодные участки (на рис. 1 обозначены буквой К), на которые ток натекает. Несмотря на то, что одни и те же участки с частотой 50 Гц становятся то анодными, то катодными, коррозия происходит в те полупериоды, когда ток сходит с трубы в грунт. Зонами риска являются



Рис. 2. Фарадеевское выпрямление (асимметрия тока во времени)

Fig. 2. Faradaic rectification (current asymmetry over time)

места с максимальной плотностью тока, сходящего с трубы: концы участка влияния, точки с минимальным сопротивлением «труба – земля» (дефекты изоляции в низкоомном грунте), участки вблизи заземлений трубопровода.

Было выявлено фарадеевское выпрямление (Faradaic rectification) [12], при котором наложение переменного тока на трубопровод, находящийся в грунте, приводит к необратимому смещению его среднего потенциала в анодную (растворяющую) область. Это ключевой физико-химический механизм, лежащий в основе АС-коррозии. Качественно процесс представлен на графике (рис. 2).

Асимметрия анодных и катодных процессов объясняется катодно-омическим контролирующим процессом, характерным для подземной коррозии. Таким образом, из-за разной кинетики растворение металла анодные реакции протекают с большей интенсивностью, чем восстановительные реакции. В результате возникает чистый положительный ток, ведущий к потере металла. Переменный ток разрушает защитные оксидные или солевые плёнки на поверхности металла, обнажая активный металл и облегчая его растворение в анодные полупериоды.

Если исходной гипотезой было понимание АС-коррозии как следствия фарадеевского выпрямления тока [12], то современные исследования [15, 16] открыли сложные самоограничивающие эффекты на границе раздела фаз и нелинейный характер зависимости скорости коррозии от плотности переменного тока. В ходе экспериментального исследования [18] коррозии образцов из трубной стали в модельном электролите при наложении переменного тока заданной плотности подтверждена нелинейная зависимость скорости коррозии от плотности переменного тока. Также экспериментально подтвержден минимальный уровень коррозии при 16–20 А/м² и резкий рост скорости коррозии при переходе через этот рубеж. Аналогичный результат — экспериментальное подтверждение, что скорость АС-коррозии резко возрастает после превышения определённой критической плотности переменного тока, получено в работе [19], также в работе отмечается критическое влияние pH: низкий уровень pH значительно ускоряет процесс АС-коррозии, в то время как высокий существенно снижает. Также влияние pH рассмотрено в работах [20, 21], которые внесли вклад в понимание факторов АС-коррозии.

В работе [21], моделирующей соседние дефекты, проводилось измерение pH у поверхности ме-

талла и моделирование массопереноса с помощью уравнения Нернста – Планка. В ходе исследований было выявлено, что плотность переменного тока не влияет на разность потенциалов между дефектами, а его поле изменяет pH у поверхности: он растёт в анодной зоне и падает в катодной, что создаёт концентрационную поляризацию, которая самоограничивает процесс коррозии. Это даёт фундаментальное объяснение нелинейности и самоограничения АС-коррозии, меняет взгляд на процесс: высокий АС-ток не всегда означает пропорциональный рост скорости коррозии из-за возникающих химических ограничений.

С 2020 г. наблюдается переосмысление критериев катодной защиты в условиях индуктивного влияния. Работа [22] имеет фундаментальное значение для пересмотра и уточнения нормативных требований к катодной защите на участках с индуктивным влиянием.

В данной работе обосновано, что при наличии АС-влияния традиционный критерий минус 0,85 В по медно-сульфатному электроду сравнения (МСЭ) может быть недостаточен. Для поддержания защитного состояния в условиях помех может потребоваться более отрицательный потенциал, т. е. необходимо сменить парадигму в установлении критериев защиты при наведении на трубопровод индуцированного тока.

Так, в отчете [16] в ходе множественных экспериментов отмечается порог плотности переменного тока 200 А/м², при котором защитный потенциал минус 0,85 В по МСЭ становится неэффективным. При этом также отмечается, что тем не менее смещение потенциала за счёт катодного постоянного тока все же даёт эффект снижения скорости растворения металла.

Ранее в работе [23] обращалось внимание на измерение скорости АС-коррозии при различных соотношениях плотностей переменного и постоянного токов (в англоязычных источниках обозначается как АС/DC), что важно в рамках поиска новых критериев оценки эффективности работы катодной защиты в условиях электромагнитного воздействия ВЛ и ЭЖД на переменном токе. В итоговых исследованиях АССМ [15] и РНМСА № 900 [16] также делается акцент на важность отношения плотности переменного и постоянного тока при катодной защите как ключевой фактор скорости коррозии. Помимо этого также анализируется влияние динамических помех переменного тока [24].

В работе [25] проводится не только анализ влияния переменного тока на катоднозащищенный трубопровод, но и катодное расслоение изоляционного покрытия для различных стандартных покрытий в различных условиях pH электролита, т. е. рассмотрен один из центральных рисков совместного воздействия катодного и индуцированного тока.

В рамках моделирования и расчётной оценки угроз и влияния ВЛ и ЭЖД переменного тока на МГ можно выделить два методологических подхода: детерминированный и стохастический. Отечественные разработки в основном направлены на создание аналитических детерминированных моделей [14, 26–29], в то время как зарубежные разработки либо используют более сложные математические методы [30], как, например, метод конечных элементов для моделирования в рамках детерминированного подхода, либо демонстрируют стохастический подход с учетом вероятного управления рисками [16, 31, 32].

В работе [26] получены модели для расчета распределения опасных наведенных напряжений в точках разрыва трубопровода, при этом особое внимание уделено специфике тяговых сетей ЭЖД на переменном токе. В [27] указывается на новую, ранее не всегда учитывавшуюся опасность от высших гармоник. Так, например, показано, что статические тиристорные компенсаторы способны генерировать высшие гармоники, например, 250 Гц, которые могут наводить напряжения на МТ, сопоставимые по уровню с основной гармоникой 50 Гц, что меняет ранее установленную картину влияния ЭЖД на трубопровод. В работе [28] обратное влияние МТ с низким продольным сопротивлением приводит к перераспределению токов в рельсах и земле, что может снижать уровень наведенных напряжений на самом трубопроводе, но влиять на работу устройств защиты рельсов.

Аналитические модели работ [14, 29] предлагают четкие аналитические модели для оценки влияния ВЛ на МТ с учетом конфигурации ВЛ, расстояния между ВЛ и МТ, удельного сопротивления грунта. Сравнительный анализ показывает, что учёт этих факторов может изменять оценку максимального наведённого напряжения на 15–30 %. Эти работы могут лечь в основу проектирования средств ЭХЗ на участках сближения МТ с ВЛ.

Более детальные проектные расчёты рассматриваются в работе [30]. Здесь проведено численное моделирование с применением метода конечных элементов в специализированном программном обеспечении. Получены детальные распределения плотности переменного тока на поверхности трубопровода в зависимости от расстояния до ВЛ, удельного сопротивления грунта и состояния изоляционного покрытия. Визуализированы зоны концентрации тока на дефектах.

Если недостатком аналитических методов расчёта можно назвать недостаточную детализацию и визуализацию, то недостатком метода конечных элементов следует назвать большую чувствительность к объему и качеству исходных данных. С учетом моделирования МТ и грунта, параметры которых (состояние изоляционного покрытия, наличие дефектов, удельное электрическое сопротивление грунта) меняются по длине и в объеме, точность таких методов снижается, либо существенно увеличивается трудоемкость сбора и обработки исходных данных.

Таким образом, на этапе оценки инвестиций, а также при управлении готовым объектом на первый план выходят методы вероятностной оценки и управления рисками. Так, в работе [32] представлена модель для оценки давления разрыва в трубопроводах с коррозионными дефектами, которая используется в анализе надёжности для оценки вероятности отказа.

Другой проблемой наведения переменных токов является искажение измерений на МТ. Фарадеевское выпрямление смещает истинный потенциал трубы в положительную сторону (делает его менее отрицательным). Прибор, измеряющий потенциал «труба – земля», может показывать нормальное защитное значение (например, минус 0,85 В по МСЭ), в то время как реальный потенциал металла уже сместился в опасную зону (например, минус 0,75 В по МСЭ). Это создаёт иллюзию защищённости при фактическом её отсутствии. Одно из направлений проекта АССМ — разработка и применение методов полевого мониторинга и оценки риска. Ключе-

вые данные для демонстрации системного подхода на основе реальных полевых данных представлены в [33].

Также интерес представляют междисциплинарные исследования по цифровизации системы ЭХЗ и противокоррозионного мониторинга объектов МТ, как например [34], где предлагается аппаратно-программный комплекс, объединяющий классическую трехэлектродную электрохимическую ячейку для ЭХЗ, электронику для автоматического регулирования тока и «интернет вещей» для передачи данных.

Обзор будет не полным без анализа международных, национальных и отраслевых нормативных документов.

Так, в России в августе 2025 г. вступил в силу ГОСТ 9.922–2024 «Единая система защиты от коррозии и старения. Дополнительные рекомендации по оценке угрозы коррозионного воздействия переменного тока на стальные подземные трубопроводы». Документ учитывает актуальные отечественные и зарубежные исследования и аналитические наработки в области оценки и моделирования влияния ВЛ на МТ:

- количественные критерии угрозы коррозионного воздействия: отсутствует при плотности переменного тока менее 20 А/м², в диапазоне 20–100 А/м² учитывается плотность постоянного тока (присутствует от 1 А/м²) и соотношение плотности переменного тока к плотности постоянного тока (присутствует от 3), свыше 100 А/м² присутствует вне зависимости от постоянной плотности тока;

- детально регламентированная методика измерений с построением схем и формулами обработки данных;

- комплексная методика прогнозирования влияния ВЛ при проектировании, включающая построение расчётной схемы сближения трасс, учёт конфигурации фаз, тока нагрузки, удельного электрического сопротивления грунта, расчёт распределения наведённого потенциала и плотности АС-тока по длине трубопровода;

- вводятся новые расчётные величины: критическая протяжённость сближения и коэффициент, учитывающий влияние катодной защиты и ионного состава грунта на изменение удельного сопротивления грунта у дефекта, что уточняет прогноз плотности тока.

Проведем сравнительный анализ с международными и зарубежными стандартами:

- ISO 18086:2019 «Corrosion of metals and alloys — Determination of AC corrosion — Protection criteria» (Коррозия металлов и сплавов — Определение коррозии под действием переменного тока — Критерии защиты);

- DIN EN 50443:2019 «Einwirkungen von Starkstromanlagen und von elektrisch betriebenen Bahnen auf metallische Rohrleitungen» (Влияние электроустановок высокого напряжения и электрифицированных железных дорог на металлические трубопроводы);

- NACE SP21477–2021 «Alternating Current Corrosion on Cathodically Protected Pipelines: Risk Assessment, Mitigation, and Monitoring» (Коррозия под действием переменного тока на трубопроводах с катодной защитой: оценка риска, меры по снижению и мониторинг).

Сравнительный анализ представлен в табл. 1.

В целом ISO 18086:2019 задаёт только базовый критерий, без инженерных методов, а DIN EN 50443:2019 делает упор на электробезопасность,

Таблица 1. Анализ нормативных документов
Table 1. Analysis of regulatory documents

Наименование нормативного документа (статус)	Основной результат (критерии и методы)	Практическая значимость
ISO 18086:2019 (международный)	Основной критерий: плотность переменного тока на расчётном дефекте $1 \text{ см}^2 \leq 30 \text{ А/м}^2$ для защищённых трубопроводов. Даёт общие принципы оценки и измерений без детальных инженерных расчётов.	Задаёт международный базовый критерий — единый пороговый уровень для оценки опасности коррозии переменным током. Основа для разработки национальных стандартов.
ГОСТ 9.922–2024 (Россия, страны СНГ)	Чёткие критерии по плотности тока на вспомогательном электроде площадью 1 см^2 : $20–100 \text{ А/м}^2$ с учётом отношения плотностей переменного и постоянного тока. Схемы измерений и методика моделирования магнитного влияния. Вводит понятие критической длины сближения.	Как справочник предоставляет готовые алгоритмы и формулы для проектировщиков и служб эксплуатации на всех этапах. Позволяет провести полный цикл от прогноза до мониторинга.
NACE SP 21477–2021 (США, международный)	Системный подход: оценка индуктивного, резистивного и ёмкостного влияния, критерии для коррозии под действием переменного тока и безопасности. Рекомендует пороговые значения плотности тока $30–100 \text{ А/м}^2$. Является наиболее полным практическим руководством.	Используется энергетическими и трубопроводными компаниями для проектов и оценки рисков по всему миру. Содержит рекомендации по защитным мерам.
DIN EN 50443:2019 (Германия, ЕС)	Фокус на безопасности персонала и оборудования от опасных наведённых напряжений (аварийный и нормальный режим). Содержит методики расчёта наведённых напряжений и токов.	Является стандартом по электробезопасности. Обязателен к применению в ЕС при оценке совместного прохождения коммуникаций. Обеспечивает безопасность, но не решает вопросы долгосрочной коррозии.

и является не прямым аналогом, а скорее стандартом по безопасности.

Наиболее близкими по охвату (коррозия и влияние) являются ГОСТ 9.922–2024 и NACE SP21477–2021.

Главное различие в методологии подходов: ГОСТ 9.922–2024 предлагает детерминированную методологию с акцентом на расчеты и однозначные критерии, а NACE SP21477–2021 — стохастическую методологию, ориентированную на гибкий, риск-ориентированный и вероятностный подход, где мониторинг и анализ данных — основа для решений. NACE SP21477–2021 идеален для интеграции в системы управления проектированием (предпроектная стадия) и целостностью трубопроводов, требующие оценки вероятности отказов, в то время как ГОСТ 9.922–2024 предоставляет четкий алгоритм для инженерного проектирования и проверяющих органов, минимизирующий субъективизм (проектная документация). Следовательно, методики не исключают, а дополняют друг друга: детерминированный подход позволяет выявить зоны риска, а вероятностная оценка — эффективно контролировать эти риски на протяжении жизненного цикла.

Если ГОСТ 9.922–2024 оценивает угрозу, устанавливает методы и критерии оценки, то ранее введенный, в апреле 2022 г., ГОСТ Р 9.604–2021 «Единая система защиты от коррозии и старения. Устройства защиты от коррозии переменным током. Общие технические требования» регламентирует средства и методы защиты, задавая единые технические требования к устройствам защиты трубопровода (УЗТ) от индуцированного переменного тока для устранения выявленной угрозы.

Таким образом, ГОСТ 9.922–2024 является современным, конкурентоспособным стандартом, который находится в русле международной тенденции, превосходит их по глубине проработки инженерных методик и степени детализации математического аппарата, а в совокупности с ГОСТ Р 9.604–2021 создает замкнутый нормативный цикл проектирования средств защиты от коррозии с уче-

том индуктивного влияния ВЛ различной конфигурации.

Стоит отметить, что для обоснования решений на международном уровне следует ссылаться на ISO 18086 и NACE SP21477–2021. ГОСТ 9.922–2024 и ГОСТ Р 9.604–2021 применим на территории России и стран СНГ.

Рассмотрим действующие отраслевые нормативные документы: СТО Газпром 9.0-001–2009, СТО Газпром 9.0-003–2020, РД-17.220.00-КТН-151–10, РД-91.020.00-КТН-170–17.

В СТО Газпром 9.0-001–2009 «Защита от коррозии. Основные положения» приводятся вероятности коррозионной опасности:

— «отсутствует» при плотности переменного тока менее 30 А/м^2 , дополнительные меры не требуются;

— «возможна» при плотности переменного тока $30–100 \text{ А/м}^2$, требуется контроль;

— «вероятна» при плотности переменного тока более 100 А/м^2 , требуются технические решения по ограничению воздействия.

В СТО Газпром 9.0-003–2020 «Защита от коррозии. Проектирование электрохимической защиты подземных сооружений» приводится методика расчёта наведенного напряжения, а также его ограничения по предельному напряжению касания (60 В) и критическому значению разности потенциалов «труба–земля». Критическое значение потенциала «труба–земля» рассчитывается по критической плотности переменного тока на дефекте.

В нормативных документах ПАО «Транснефть» РД-17.220.00-КТН-151–10 «Методика определения воздействия ВЛ-110 кВ и выше на коррозию нефтепровода и мероприятия по защите трубопровода» и РД-91.020.00-КТН-170–17 «Нормы проектирования электрохимической защиты магистральных трубопроводов и сооружений НПС» в качестве критического значения плотности переменного тока принимается значение 20 А/м^2 . Критическое значение разности потенциалов «труба–земля» рассчитывается по аналогии с СТО Газпром 9.0-003–2020.

Следует отметить, что в отраслевых нормативных документах, в отличие от ГОСТ 9.922–2024, не учитывается влияние конфигурация ВЛ, а при расчете критического значения разности потенциалов «труба–земля» не учитывается влияние катодной защиты на удельное сопротивление грунта у дефекта, что указывает на необходимость их пересмотра в соответствии с имеющимися научно-техническими достижениями в области моделирования влияния ВЛ на МТ.

Результаты и обсуждение

В ходе обзора и систематизации информации получены следующие результаты, достигнутые современными исследователями:

1) подтверждены фундаментальные механизмы и влияющие факторы: механизмом АС-коррозии является фарадеевское выпрямление [15, 16], экспериментальные исследования доказали значительное влияние на скорость процесса рН грунта и выявили нелинейную зависимость скорости коррозии от плотности тока [16, 18–20], выявлены значения плотности переменного тока коррозии, при которых скорость коррозии минимальна 16–30 А/м² [18, 19];

2) анализ показал, что традиционный контроль по потенциалу «труба–земля» становится недосягаемым при значительном уровне переменных помех [16, 22–25], что требует перехода к мониторингу плотности переменного тока и применения специализированных УЗТ на опасных участках;

3) установление пороговых значений для риска АС-коррозии: требующие контроля — 20–100 А/м², при этом ключевое значение имеет значение постоянного тока (более 1 А/м²) и отношение плотностей переменного и постоянного тока не менее 3, требующие специальных УЗТ: более 100 А/м²;

4) результаты моделирования электромагнитного влияния: современные расчётные модели повышают оценку на 15–30 % [14, 26–29]; наряду с детерминированными методами расчёта развиваются стохастические (вероятностные) [15, 16, 31, 32];

5) нормирование параметров в международных и национальных стандартах базируется на актуальных научных представлениях.

Сравнительный анализ нормативных подходов показал:

1) различие методологических подходов:

— детерминированный подход российских нормативных документов ГОСТ 9.922–2024, СТО Газпром 9.0-003–2020, РД-91.020.00-КТН-170–17;

— вероятностный (риск-ориентированный) подход NACE SP21477–2021;

2) различие в пороговых значениях национальных стандартов, с которых появляется вероятная угроза коррозии переменным током 20 А/м², в ГОСТ 9.922–2024 и 30 А/м² в зарубежных NACE SP21477–2021 и ISO 18086:2019;

3) несоответствие отраслевых Российских стандартов вступившему в силу в 2025 г. ГОСТ 9.922–2024.

Выявлены пока не решенные проблемы:

1) отсутствие универсальных прогнозных моделей: детерминированные модели плохо работают в сложных полевых условиях с неоднородным грунтом, износом изоляции и динамически меняющейся нагрузкой ВЛ и ЭЖД;

2) недостаточная интеграция данных мониторинга: нет отработанных методик для оперативного использования данных о плотности тока и потен-

циале в системах управления целостностью трубопроводов;

3) «стареющая» инфраструктура: слабо изучено влияние индуктивного влияния на МТ с деградировавшим изоляционным покрытием, где коррозионные процессы носят особенно опасный локальный характер;

4) необходимость адаптации Российских стандартов под риск-ориентированный подход, смещающий фокус с фиксированных лимитов на оценку вероятности отказа.

Таким образом:

1) угроза АС-коррозии требует принципиально новых подходов к контролю и мониторингу, управлению коррозионной надёжностью МТ;

2) в то же время требуется осмысление и проверка пороговых значений, так как при анализе научных и нормативных источников они представлены в виде диапазонов: минимальных значений, при превышении которых существует угроза АС-коррозии (лежит в диапазоне от 16–30 А/м²), и предельных значений, при которых отмечается неэффективность катодной защиты (лежит в диапазоне 100–200 А/м²);

3) актуальные стандарты задают необходимый минимум, но для прорывного повышения надёжности необходимы интеллектуальные адаптивные системы, способные предсказывать и парировать коррозионные угрозы в реальном времени;

4) обеспечение целостности трубопроводов в зонах влияния ВЛ лежит в области риск-ориентированного подхода, основанного на вероятностных моделях и непрерывном мониторинге, а не на соблюдении жестких нормативных порогов.

Полученные результаты указывают на системный кризис классического детерминированного подхода к защите, основанного на фиксированных пороговых значениях потенциала. Главным парадоксом является возможность развития коррозии при формальном соблюдении нормативных требований к потенциалу катодной защиты. Это диктует необходимость смены парадигмы: перехода от контроля состояния к управлению риском. Таким управлением могут стать вероятностные модели, учитывающие неоднородность грунта и изменение его свойств в течение года; состояние покрытия и его старение; распределение защитных токов и потенциалов, а также нагрузки ВЛ и нелинейные электрохимические эффекты. Технологической основой для этого перехода являются адаптивные системы мониторинга и защиты с элементами «интернета вещей», способные в реальном времени анализировать плотности переменного и постоянного токов и корректировать режим работы установок ЭХЗ. Отсутствие открытой статистики по пересечениям и сближениям инфраструктуры подтверждает ведомственный характер проблемы и усложняет макромасштабный анализ рисков, оставляя актуальными методы локального геоинформационного моделирования.

Таким образом, дальнейший прогресс в области защиты МТ от влияния ВЛ лежит в плоскости объединения классических знаний о коррозии и электрохимической защите с методами науки о больших данных. Это позволит перейти от устранения последствий воздействий (реактивный подход) к прогнозированию поведения системы в будущем на основе анализа данных (предиктивный подход) и опережающему обеспечению целостности МТ (превентивный подход).

Заключение

В результате исследования систематизированы современные научные представления и нормативные требования в области оценки влияния высоковольтных линий и электрифицированных железных дорог на переменном токе на коррозионную безопасность магистральных трубопроводов; классифицированы исследования по ключевым проблемным областям и установлены основные физико-химические механизмы, количественные критерии оценки и пределы применимости традиционных методов контроля; проведена оценка и интерпретация решенных и нерешенных проблем; намечен вектор дальнейших изысканий.

Обзор свидетельствует о высоком уровне изученности физических основ проблемы влияния высоковольтных линий на магистральные трубопроводы. Таким образом, физико-химические основы влияния (индуктивное воздействие, механизм АС-коррозии) можно считать установленными. Сформированная научная и нормативная база обеспечивает необходимый фундамент для инженерной практики.

Ключевой современный вызов носит не теоретический, а методологический и прикладной характер. Он связан с переходом от расчетов для идеализированных условий к обеспечению надежности сложной, неоднородной и стареющей инфраструктуры. Отсюда вытекают основные направления дальнейших исследований:

- разработка и внедрение цифровых вероятностных моделей (цифровых двойников) для оценки коррозионного риска с учетом всех факторов;
- создание и стандартизация адаптивных интеллектуальных систем катодной защиты, интегрирующих мониторинг плотностей переменного и постоянного токов в реальном времени;
- эволюция нормативной базы в сторону риск-ориентированных принципов.

Дальнейший прогресс в области защиты магистральных трубопроводов от влияния высоковольтных линий лежит в плоскости объединения классических знаний о коррозии и электрохимической защите с методами науки о больших данных. Это позволит перейти от устранения последствий воздействий (реактивный подход) к прогнозированию поведения системы в будущем на основе анализа данных (предиктивный подход), а также к опережающему обеспечению целостности магистральных трубопроводов (превентивный подход).

Список источников / References

1. Baeckmann W., Schwenk W. Handbuch des katodischen Korrosionsschutzes. Verlag Chemie. 1980. 465 s. (In Germ.).
2. Sommerfeld A. Über die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphie. *Annalen der Physik*. 1909;333(28):665–736. <https://doi.org/10.1002/andp.19093330402>. (In Germ.).
3. Carson J. Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. *Bell System Technical Journal*. 1926;5(10):539–554.
4. Pollaczek F. Über das Feld einer unendlich langen wechselstrom durchflossenen einfachleitung. *Electrische Nachrichten Technik*. 1926;3(4):339–359. (In Germ.).
5. Бурсиан В. Р., Фок В. А. Электромагнитное поле переменного тока в цепи с двумя заземлениями // Журнал Русского физико-химического общества. 1926. Т. 58, Вып. 2. С. 355–363.
6. Bursian V. R., Fok V. A. Elektromagnitnoye pole peremennogo toka v tsepi s dvumya zazemleniyami. *Zhurnal Russkogo*

Fiziko-Khimicheskogo Obshchestva. 1926;58(2):355–363. (In Russ.).

6. Dawalibi F. P., Southey R. D. Analysis of electrical interference from power lines to gas pipelines. I. Computation methods. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1989;4(3):1840–1846. <https://doi.org/10.1109/61.32680>.

7. Дмитриев В. И. Электромагнитные поля в неоднородных средах. Москва: Издательство МГУ им. М. В. Ломоносова, 1969. 131 с.

Dmitriyev V. I. Elektromagnitnyye polya v neodnorodnykh sredakh. Moscow, 1969. 131 p. (In Russ.).

8. Толстая М. А., Иоффе Э. И., Потемкинская И. В. Влияние переменного тока промышленной частоты на электрокоррозию стали // Газовое дело. 1963. № 3.

Tolstaya M. A., Ioffe E. I., Potemkinskaya I. V. Vliyaniye peremennogo toka promyshlennoy chastoty na elektrokorroziyu stali. *Gazovoye Delo*. 1963;3. (In Russ.).

9. Толстая М. А., Иоффе Э. И., Потемкинская И. В. Электрохимическая коррозия стальных подземных сооружений переменным током промышленной частоты // Газовое дело. 1964. № 3.

Tolstaya M. A., Ioffe E. I., Potemkinskaya I. V. Elektrokhimicheskaya korroziya stal'nykh podzemnykh sooruzheniy peremennym tokom promyshlennoy chastoty. *Gazovoye Delo*. 1964;3. (In Russ.).

10. Толстая М. А., Иоффе Э. И., Потемкинская И. В. Влияние соледержания, ионного состава, величины рН и степени аэрации грунта на коррозию подземных стальных трубопроводов под действием переменного тока // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. 1964. № 1. С. 16–24.

Tolstaya M. A., Ioffe E. I., Potemkinskaya I. V. Vliyaniye solesoderzhaniya, ionnogo sostava, velichiny pH i stepeni aeratsii grunta na korroziyu podzemnykh stal'nykh truboprovodov pod deystviyem peremennogo toka. *Transport i Khraneniye Nefti i Nefteproduktov*. 1964;1:16–24. (In Russ.).

11. Стрижевский И. В., Дмитриев В. И. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения. М.: Изд-во литературы по строительству, 1967. 247 с.

Strizhevskiy I. V., Dmitriyev V. I. Teoriya i raschet vliyaniya elektrifitsirovannoy zheleznoy dorogi na podzemnyye metallicheskiye sooruzheniya. Moscow, 1967. 247 p. (In Russ.).

12. Goidanich S., Lazzari L., Ormellese M. AC corrosion — Part 1: Effects on overpotentials of anodic and cathodic processes. *Corrosion Science*. 2010;52(2):491–497. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.10.005>. EDN: NWNNDTJ.

13. Xu L. Y., Su X., Cheng Y. F. Effect of alternating current on cathodic protection on pipelines. *Corrosion Science*. 2013;66:263–268. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.09.028>.

14. Крапивский Е. И., Яблuchанский П. А. Алгоритм расчета электромагнитного влияния линии электропередачи переменного тока на подземный трубопровод // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 2. С. 213–224. EDN: RGRCIJ.

Krapivskiy E. I., Yabluchansky P. A. Algorithm for ac transmission line electromagnetic effect on underground pipework. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2013;2:213–224. EDN: RGRCIJ. (In Russ.).

15. Efarahani E. M., Su Yu., Chen X. [et al.]. AAC corrosion of steel pipeline under cathodic protection: A state-of-the-art review. *Materials and Corrosion*. 2024;75(3):290–314. <https://doi.org/10.1002/maco.202313955>. EDN: TXEHUS.

16. Zhou Q., Wang H. Probabilistic Performance Evaluation of Cathodically Protected Pipeline Considering AC Corrosion. Final Report for PHMSA Project no. 900. University of Akron, Rutgers University, 2024.

17. Zhang S., Li Z., Yang C., Gou J. The AC Corrosion Mechanisms and Models: A Review. *Corrosion*. 2020;76(2):188–201. <https://doi.org/10.5006/3362>.

18. Ракито О. Н., Агинея Р. В. Экспериментальное исследование зависимости скорости коррозии металла от плотности переменного синусоидального тока промышленной частоты // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2024. Т. 14, № 3. С. 272–281. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2024-14-3-272-281>. EDN: HRFBCT.
- Rakito O. N., Aginey R. V. Experimental study of dependence of metal corrosion rate on density of alternating sinusoidal current of industrial frequency. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2024;14(3):272–281. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2024-14-3-272-281>. EDN: HRFBCT. (In Russ.).
19. Zhu W., Xu Ch., Wang Y., Wang X. Studying the factor limitations of AC corrosion on pipelines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024;2760(1):012058. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2760/1/012058>.
20. Yang J., Zhu M., Le Z., Zhao B. [et al.]. Influence of alternating current on corrosion behavior of X100 steel in Golmud soil simulated solution with different pH. *International Journal of Electrochemical Science*. 2020;15(10):10423–10431. <https://doi.org/10.20964/2020.10.28>.
21. Lan W., Wei B., Li Q. [et al.]. Corrosion mechanisms of pipelines with adjacent coating defects under AC interference: An interfacial process analysis. *Materials & Design*. 2025;256:114295. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114295>.
22. Büchler M. On the mechanism of cathodic protection and its implications on criteria including AC and DC interference conditions. *Corrosion*. 2020;76(5):451–463. <https://doi.org/10.5006/3379>.
23. Olesen A. J., Dideriksen K., Nielsen L. V., Møller P. Corrosion rate measurement and oxide investigation of AC corrosion at varying AC/DC current densities. *Corrosion*. 2019;75(9):1026–1033. <https://doi.org/10.5006/3168>.
24. Chen L., Du Y., Liang Y. [et al.] Research on dynamic alternating current corrosion behavior of X65 pipeline steel under cathodic protection. *Corrosion*. 2023;79(5):471–485. <https://doi.org/10.5006/4240>.
25. Laughorn T. Effects of AC interference on pipelines under cathodic protection and cathodic disbondment of pipeline coatings. *Honors Research Projects*. Williams Honors College, 2024. P. 1866. URL: https://ideaexchange.uakron.edu/honors_research_projects/1866. (accessed: 10.03.2026).
26. Суслов К. В., Крюков А. В., Илюшин П. В. [и др.]. Моделирование электромагнитных влияний многопроводных тяговых сетей на трубопроводы // iPolytech Journal. 2023. Т. 27, № 3. С. 552–564. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-552-564>. EDN: PGNVMM.
- Suslov K. V., Kryukov A. V., Ilyushin P. V. [et al.]. Modeling of electromagnetic influences of multi-wire traction networks for pipelines. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):552–564. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-552-564>. EDN: PGNVMM. (In Russ.).
27. Булатов Ю. Н., Крюков А. В., Воронина Е. В., Крюков А. Е. Учёт влияния трубопроводов на электромагнитные поля тяговых сетей // Системы. Методы. Технологии. 2025. № 4(68). С. 41–48. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2025-4-41-48>. EDN: TNKGPW.
- Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Voronina E. V., Kryukov A. E. Consideration of the influence of pipelines on the electromagnetic fields of traction networks. *Systems Methods Technologies*. 2025;4(68):41–48. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2025-4-41-48>. EDN: TNKGPW. (In Russ.).
28. Крюков А. В., Суслов К. В., Крюков А. Е. Моделирование электромагнитных влияний тяговых сетей, оснащенных средствами компенсации реактивной мощности на трубопроводы // Интеллектуальная электротехника. 2024. № 3 (27). С. 65–81. EDN: EWTBSF.
- Kryukov A. V., Suslov K. V., Kryukov A. E. Modeling of electromagnetic influences of traction networks equipped with reactive power compensation means on pipelines. *Smart Electrical Engineering*. 2024;3(27):65–81. EDN: EWTBSF. (In Russ.).
29. Крюков А. В., Илюшин П. В., Суслов К. В., Крюков А. Е. Учет транспозиции проводов при моделировании электромагнитных влияний ЛЭП на трубопроводы // Электричество. 2023. № 3. С. 22–34. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2023-3-22-34>. EDN: SFONVO.
- Kryukov A. V., Ilyushin P. V., Suslov K. V., Kryukov A. E. Consideration of Wire Transposition in Modeling the Electromagnetic Effects of Power Lines on Pipelines. *Elektrichestvo*. 2023;3:22–34. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2023-3-22-34>. EDN: SFONVO. (In Russ.).
30. Zhang Ya., Li L. Study of alternating current transmission line interference on long-distance pipelines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2025;2993(1):012066. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2993/1/012066>.
31. Markić M., Arat S., Fürbeth W. Effect of AC interference on the corrosion behavior of cathodically protected mild steel in an artificial soil solution. Part I: Investigation on formed corrosion product layer. *Materials and Corrosion*. 2022;73(1):45–54. <https://doi.org/10.1002/maco.202112640>. EDN: WPIDFA.
32. Kere K., Huang Q. Development of probabilistic failure pressure models for pipelines with single corrosion defect. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2022;197:104656. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104656>. EDN: GHXVMVG.
33. Thompson I., Martin P. AC corrosion monitoring on high pressure pipelines. *CORROSION 2015*. 2015. Paper NACE–2015–5470.
34. Budiman F., Rahmawati D., Aulia D. [et al.]. Integrating IoT-enabled automated impressed current cathodic protection systems with metal potential monitoring: a digital technology approach to address corrosion for promoting environmental ecosystem conservation. *Measurement*. 2026;258:119167. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.119167>. EDN: KXMNQA.
- Вклад авторов:**
- Ю. А. Краус.** Сбор и анализ нормативных и научных источников за последние 5 лет, написание основного текста статьи, построение схем, критический анализ полученных результатов, редактирование и правка текста статьи.
- К. С. Маркелова.** Сбор и анализ научных источников предшествующего периода, подготовка исторической справки, редактирование текста статьи.
- Authors' contribution:**
- Yuriy A. Kraus.** Collection and analysis of regulatory and scientific sources over the past 5 years, writing the main text of the article, construction of diagrams, critical analysis of the obtained results, editing and revision of the article.
- Kseniya S. Markelova.** Collection and analysis of scientific sources from the preceding period, preparation of the historical background, editing of the article.
- Информация об авторах:**
- КРАУС Юрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» Омского государственного технического университета, г. Омск.
SPIN-код: 5892-9449
AuthorID (РИНЦ): 686006
ORCID: 0000-0002-0660-7896
AuthorID (SCOPUS): 56503666900
ResearcherID: H-4404-2016
e-mail: omgtu.feom@yandex.ru
- МАРКЕЛОВА Ксения Сергеевна**, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение железнодоро-

рожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения, г. Омск.

SPIN-код: 8406-8918

AuthorID (РИНЦ): 648187

ORCID: 0000-0001-6316-0659

e-mail: markelovaks.omgups@gmail.com

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 05.02.2026; одобрена после рецензирования 25.02.2026; принята к публикации 16.03.2026.

Information about the authors:

KRAUS Yuriy Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Oil and Gas Storage, Standardization and Certification Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 5892-9449

AuthorID (RSCI): 686006

ORCID: 0000-0002-0660-7896

AuthorID (SCOPUS): 56503666900

ResearcherID: H-4404-2016

e-mail: omgtu.feom@yandex.ru

MARKELOVA Kseniya Sergeyevna, Senior Lecturer of the Electric Power Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University, Omsk.

SPIN-code: 8406-8918

AuthorID (RSCI): 648187

ORCID: 0000-0001-6316-0659

e-mail: markelovaks.omgups@gmail.com

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 05.02.2026; approved after reviewing 25.02.2026; accepted for publication 16.03.2026.