

УДК 620.197, 669.15-198.2, 658.562
DOI: 10.22213/2413-1172-2026-1-4-11

Систематизация факторов, влияющих на скорость углекислотной коррозии в процессе транспортировки неподготовленных углеводородов по трубопроводам из низколегированных сталей

А. С. Ровбо, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
В. М. Кондратьева, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Г. В. Демьянов, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
В. А. Левенцов, кандидат экономических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Повышение надежности систем транспортировки неподготовленных углеводородов остается одной из ключевых задач нефтегазовой отрасли, поскольку более половины отказов трубопроводов связано с углекислотной коррозией. Отсутствие единого подхода к оценке факторов, влияющих на скорость CO_2 -коррозии, затрудняет выбор материалов и прогнозирование деградации металла. Работа посвящена анализу существующих классификаций факторов, определяющих скорость углекислотной коррозии в трубопроводах из низколегированных сталей, и выявлению ограничений, присутствующих в современных подходах. Особое внимание уделено сопоставлению металлургических характеристик материалов, параметров транспортируемой среды и эксплуатационных условий, которые в разных источниках трактуются неполно или фрагментарно. В ходе исследования выполнен комплексный обзор отечественных и зарубежных работ, стандартов и корпоративных методик, а также систематизированы разрозненные данные о химических, физических, материальных и конструктивно-эксплуатационных факторах. На основе анализа предложена систематизация факторов, влияющих на скорость углекислотной коррозии в процессе транспортировки неподготовленных углеводородов по трубопроводам из низколегированных сталей, разделенная на три категории: внешние, внутренние и конструктивно-эксплуатационные. Такой подход позволяет учитывать взаимосвязи между средой, материалом и условиями эксплуатации, что ранее не рассматривалось в единой структуре. Основными результатами работы стало формирование комплексной системы факторов, влияющих на скорость углекислотной коррозии, и выявление ключевых параметров, требующих обязательного учета при прогнозировании скорости коррозии. Предложенная систематизация создает основу для разработки методики комплексной оценки коррозионной стойкости и степени агрессивности среды, а также совершенствования математических моделей прогнозирования коррозии.

Ключевые слова: коррозионная стойкость, обзор и систематизация факторов, факторы среды, металлургические факторы.

Введение
В современных условиях обеспечение качества процесса транспортировки неподготовленных углеводородов требует комплексного подхода к оценке и прогнозированию коррозионной стойкости низколегированных сталей трубопроводов. Коррозия является одним из основных факторов, влияющих на долговечность и безопасность трубопроводных систем, а скорость коррозии может рассматриваться как важнейший показатель качества процесса транспортировки неподготовленных углеводородов [1]. В данной работе рассматриваются подходы к классификации факторов, влияющих на коррозионную стойкость трубопроводов, с учетом металлургических характеристик и параметров транспортируемой среды. На сегодняшний день отсутствуют единые общепринятые требования к перечню факторов, которые должны учитываться при прогнозировании скорости коррозии и оценке агрессивности среды.

Актуальность исследования обусловлена тем, что на сегодняшний день отсутствуют комплексные обзоры на факторы, влияющие на скорость углекислотной коррозии (как отечественные, так и зарубежные NACE, NORSOK и др.).

Цель данной статьи – выполнить комплексный обзор факторов как первого шага к созданию методики оценки коррозионной стойкости и степени агрессивности среды, применимой для практических задач диагностики и проектирования трубопроводных систем; предложить систематизацию факторов, влияющих на скорость углекислотной коррозии в процессе транспортировки неподготовленных углеводородов по трубопроводам из низколегированных сталей для дальнейшей разработки методики комплексной оценки коррозионной стойкости и степени агрессивности среды, позволяющей проводить оценку качества процесса транспортировки за счет оценки влияющих на него параметров.

Научная новизна работы заключается в том, что в настоящее время не существует единой утвержденной классификации факторов, влияющих на скорость CO_2 -коррозии. В работе предпринята попытка собрать разрозненные сведения и систематизировать все известные факторы, включая влияние среды, свойства материала и условия эксплуатации, в единую структуру. Такая систематизация создаст теоретическую основу для разработки новых научно обоснованных методов прогнозирования деградации металла.

Для прогнозирования коррозионных процессов зачастую на основе экспериментальных данных разрабатываются математические модели прогнозирования скорости коррозии, учитывающие влияние среды и характеристик материалов. Традиционные модели коррозии, такие как Norsok, deWaard [2, 3], Hydrocog, Multicog, Tulsa и другие, не учитывают полный перечень параметров, которые могут влиять на прогнозирование скорости коррозии, из-за чего точность прогноза снижается, а существующие классификации параметров разнятся в различных источниках. Это происходит, поскольку отсутствуют единые общепринятые требования к перечню факторов, которые должны учитываться в таких моделях. Помимо этого, не существует стандартов и требований, позволяющих комплексно оценить воздействующие на изделие факторы, как при проведении натурных испытаний, так и при построении моделей.

В связи с этим в данной работе проводится обзор факторов, влияющих на коррозионную стойкость трубопроводов, с целью систематизации существующих подходов и разработки новых научно обоснованных подходов к прогнозированию процессов деградации металла и оценке агрессивности среды.

Обзор существующих классификаций и анализ факторов, влияющих на скорость коррозии

На основе анализа научных работ, посвященных исследованию углекислотной коррозии, были определены факторы, влияющие на коррозионные процессы.

К основным факторам, определяющим скорость коррозии трубных сталей, относятся следующие.

Внешние факторы – элементы окружающей среды, оказывающие воздействие на материал трубопровода. Они делятся:

- на химические (влияние концентрации O_2 , CO_2 , H_2S и его соединения, наличие органических и неорганических кислот, pH и взаимодействие вышеуказанных переменных);
- факторы окружающей среды (температура, уровень обводненности, состав почвы и др.) [4, 5].

Внутренние факторы – характеристики самого трубопровода и транспортируемой среды, которые делятся:

- на особенности материала трубопровода, включающие механические свойства материала, остаточные и эксплуатационные напряжения, конструктивные особенности, трещины, отложения, неметаллические включения, наличие защитного покрытия на изделии, и взаимодействие вышеуказанных переменных;
- свойства транспортируемого объекта (давление, скорость потока, структура потока и взаимодействие вышеуказанных переменных).

На рисунке 1 представлены основные факторы, влияющие на механизм образования коррозионных отложений, предложенные авторами [6].

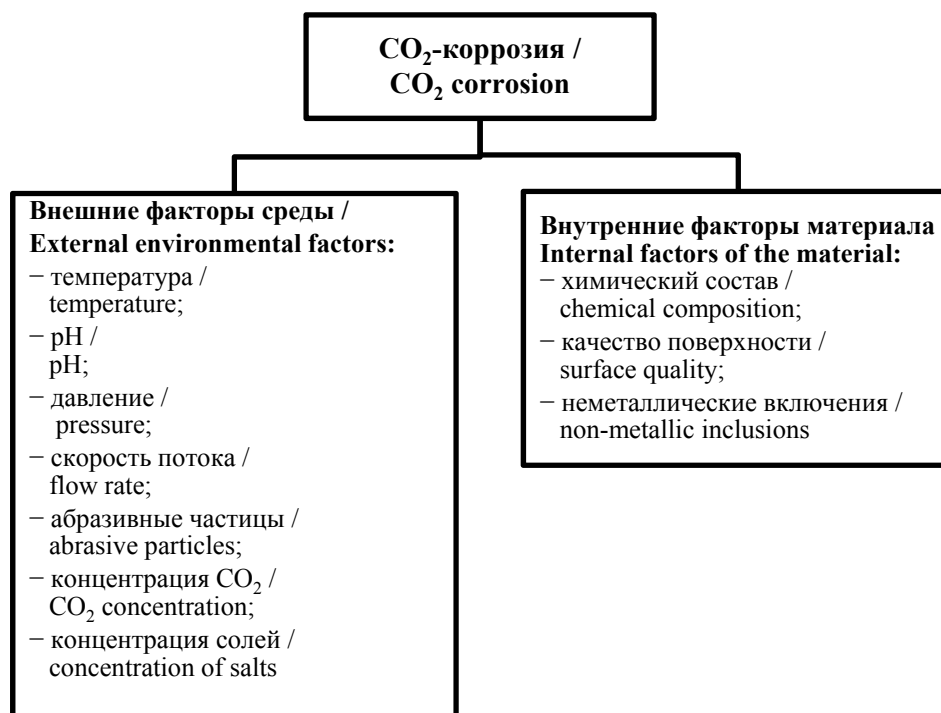


Рис. 1. Факторы, влияющие на механизм CO_2 -коррозии
Fig. 1. Factors affecting the mechanism of CO_2 corrosion

В рассмотренную выше классификацию авторами не включено влияние микроструктуры материала. Однако известно, что микроструктура напрямую влияет на скорость коррозии стали [7–10]. Химический состав стали, включая наличие легирующих элементов, таких как хром (Cr), никель (Ni) и медь (Cu), играет важную роль в повышении коррозионной стойкости материала и напрямую влияет на микроструктуру стали. Микроструктура стали, в свою очередь, оказывает значительное влияние на коррозию металла. Так, ферритно-перлитные стали демонстрируют меньшую устойчивость к коррозии по сравнению с мартенситными и бейнитными сталями, но при этом мартенситные стали более восприимчивы к водородному охрупчиванию [11–13]. Из этого можно сделать вывод, что микроструктура материала в совокупности со свойствами транспортируемой среды являются одними из ведущих и взаимосвязанных факторов, влияющих на процесс транспортировки сырья. В некоторых исследованиях отмечается, что стали с мартенситной микроструктурой, содержащие 1 или 2 % хрома, обладают лучшей коррозионной стойкостью, чем стали с ферритно-перлитной или бейнитной микроструктурой. Однако в случае стали с 3%-м хромом бейнитная микроструктура показала несколько меньшую скорость коррозии по сравнению с мартенситной [14]. В работе [15] проведено исследование влияния особенностей микроструктурного состояния на скорость коррозии низколегированных малоуглеродистых сталей для транспорта и закачки CO₂, где было показано, что в ферритно-перлитных сталях коррозионным процессам подвержен в первую очередь феррит, который, находясь в составе перлита, становится анодом и быстро растворяется. Как следствие, увеличение количества областей перлитных колоний в микроструктуре приводит к снижению общей коррозионной стойкости стали.

Кроме того, неметаллические включения, их состав и распределение в структуре стали могут существенно влиять на коррозионную стойкость. Значительное влияние на коррозионную стойкость оказывают сварные соединения, поскольку различия в химическом составе основного металла и шва могут ослаблять защитные свойства материала [16]. Также одной из причин коррозии является изменение микроструктуры стали в зоне термического воздействия сварки, обусловленное температурным градиентом.

Существует практика нанесения на трубы различных покрытий с целью защиты основного материала трубы и повышения гладкости поверхности и вместе с этим повышения эффективности работы трубопровода. Особенно актуально это становится в связи с повышением сложности разрабатываемых месторождений и повышением содержания в них количества тяжелых углеводородов [17]. Покрытия способны значительно увеличить антикоррозионные характеристики изделия.

Поскольку на сегодняшний день в отечественных стандартах отсутствует утвержденная классифика-

ция факторов, рассмотрим примеры классификаций, используемых Российскими компаниями-производителями трубной продукции.

АО «Объединенная металлургическая компания» (ОМК) в своих работах также разделяет факторы, влияющие на стойкость к CO₂ (СТО 00190242-003–2017). Методика определения коррозионной стойкости нелегированных и легированных сталей и изделий из них путем измерения плотности тока насыщения анодного растворения стали в коррозионной среде электрохимическим методом).

Внешние факторы, включающие в себя условия эксплуатации: давление, температура, обводненность, соотношение транспортируемых фаз; гидродинамика потока: скорость потока, режим потока у стенки трубы, положения по периметру, (верхняя/нижняя образующая), эрозия; наличие свободной водной фазы у поверхности; состав транспортируемой среды: состав воды, pH in-situ (метод измерения pH в месте, где находится исследуемая среда), содержание органических кислот; фракционный состав углеводородной фазы; наличие асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО); парциальное давление H₂S и CO₂; эффективность ингибитора коррозии; буферизующие pH свойства подтоварной воды; наличие в средах кислорода и других веществ, активирующих коррозию [18].

Особенности материала труб, включающие в себя химический состав стали, загрязненность неметаллическими включениями; структурное состояние и вид термической обработки; внутренние напряжения, состояние поверхности (прокатная окалина, наличие дефектов на поверхности).

В рассмотренной классификации не учитывается касательное напряжение на стенки трубопровода (КНнС), которое относится к внешним гидродинамическим факторам [19]. КНнС является основным результирующим гидродинамическим параметром. В отличие от скорости потока величина КНнС дает более точное представление об условиях протекания коррозии: чем выше значение КНнС, тем более интенсивно протекает процесс коррозии. Это связано с тем, что КНнС описывает свойства пограничного слоя потока среды, образуемого около внутренней поверхности трубы. Поэтому при высоких значениях КНнС пограничный слой среды (независимо от ее агрегатного состояния) способен механически осуществлять срыв пленки продуктов коррозии с поверхности металла [20, 21].

Другие производители трубной продукции в России и СНГ также рассматривают факторы, влияющие на надежность труб при эксплуатации [22, 23]. Эксплуатационная надежность, как правило, зависит от материала трубы, технологии изготовления, проектирования, условий монтажа и эксплуатации трубопровода.

Материал трубы и технология изготовления включают в себя химический состав стали и технологию выплавки, доводки и разливки; наличие и размер неметаллических включений; технологию прокатки труб; вид и технологию термической обра-

ботки; вид и технологию нанесения внутреннего защитного покрытия; вид и технологию наружного изолирующего или теплоизоляционного покрытия.

Проектирование и условия монтажа трубопровода включают в себя климатическую зону расположение трубопровода, способ прокладки (надземный, подземный, наличие обогрева), конфигурацию трубопровода, вид стыкового соединения (фланцы, сварка, способ изоляции сварного стыка), квалификацию персонала компании или подрядчика.

Условия эксплуатации трубопровода включают в себя следующие факторы:

а) транспортируемые среды – наличие агрессивных газов (H_2S , CO_2 , O_2); минерализация водной фазы; обводненность нефти; индекс насыщения (склонность к солеобразованию); наличие твердых абразивных частиц; наличие АСПО;

б) параметры эксплуатации – температура; давление, режим и скорость течения газожидкостной смеси; режим работы трубопровода; применение электрохимической защиты (ЭХЗ), ингибирования.

Существующие классификации носят фрагментарный характер. Так, классификация ОМК акцентируется на эксплуатационных условиях и составе среды, а ТМК – на материале трубы и технологиях изготовления. Зарубежные стандарты (например, NACE, NORSOK) фиксируют набор параметров для испытаний и прогнозных моделей, но не обеспечивают комплексного охвата факторов, учитывающих одновременно металлургические характеристики, среду и эксплуатационные условия.

Таким образом, существующие подходы ориентированы только на часть факторов (например, гид-

родинамику, состав среды или свойства материала). Это приводит к отсутствию унифицированной базы для разработки моделей прогнозирования коррозии и методик испытаний. Предлагаемая систематизация факторов призвана устранить данный пробел: она объединяет все три ключевые группы факторов (внешние, внутренние, конструктивно-эксплуатационные) в единую систему.

Систематизация факторов, влияющих на коррозионные процессы

Ниже представлена предложенная систематизация всех упомянутых факторов, влияющих на коррозионные процессы, на основе проведенного литературного обзора.

Первая категория подразумевает внешние факторы, связанные с транспортируемой средой. Внешние факторы можно разделить на две большие группы: химические факторы и факторы транспортируемой среды.

Вторая категория включает внутренние факторы, связанные с материалом трубопровода, и подразделяется на особенности материала и свойства транспортируемого объекта.

Третья категория включает конструктивные и эксплуатационные факторы, определяющие надежность трубопроводов в процессе эксплуатации.

В таблице представлены все факторы, влияющие на коррозионные процессы трубопроводов, которые могут быть использованы для разработки новых научно обоснованных подходов к прогнозированию процессов деградации металла и оценке степени агрессивности среды.

Перечень факторов, влияющих на коррозионные процессы

The list of factors influencing corrosion processes

Категория Category	Подкатегория Subcategory	Факторы Factors
Внешние факторы / External factors	Химические / Chemical	– концентрация CO_2 (парциальное давление, летучесть) / CO_2 concentration (partial pressure, fugacity); – наличие H_2S и его соединений / presence of H_2S and its compounds; – наличие кислорода (O_2) / presence of oxygen (O_2); – органические кислоты (уксусная, муравьиная и др.) / organic acids (acetic, formic, etc.); – неорганические кислоты (угольная кислота, образующаяся из CO_2) / inorganic acids (carbonic acid formed from CO_2); – pH среды (включая in-situ pH) / pH of the environment (including in-situ pH); – минерализация воды (содержание солей, ионов Cl^- , Ca^{2+} и др.) / water salinity/mineralization (salt content, Cl^- , Ca^{2+} ions, etc.); – щелочность и жесткость воды / water alkalinity and hardness; – взаимодействие компонентов среды между собой / interactions between environmental components; – эффективность ингибиторов коррозии / effectiveness of corrosion inhibitors

Продолжение таблицы

Table (continued)

Категория Category	Подкатегория Subcategory	Факторы Factors
	Факторы транспортируемой среды / Factors of the transported environment	<ul style="list-style-type: none"> – температура / temperature; – давление (общее и парциальное) / pressure (total and partial); – обводненность (количество воды в потоке) / water content (water content in the flow); – скорость потока / flow velocity; – режим потока (ламинарный/турбулентный) / flow regime (laminar/turbulent); – касательное напряжение на стенке трубы (КНнС) / wall shear stress (WSS); – положение трубы (верхняя/нижняя образующая, горизонтальное/вертикальное) / pipe orientation (top/bottom of the pipe, horizontal/vertical); – наличие абразивных частиц (песок, твердые отложения) / presence of abrasive particles (sand, solid deposits); – асфальтосмолопарафиновые отложения (АСПО) / asphaltenedeposits; – структура потока (эмульсии, расслоение фаз) / flow structure (emulsions, phase stratification)
Внутренние факторы / Internal factors	Особенности материала трубопровода / Pipeline material Properties	<ul style="list-style-type: none"> – химический состав стали (С, Cr, Ni, Cu, Mo и др.) / chemical composition of steel (C, Cr, Ni, Cu, Mo, etc.); – микроструктура (феррит, перлит, мартенсит, бейнит) / microstructure (ferrite, pearlite, martensite, bainite); – механические свойства (прочность, твердость) / mechanical properties (strength, hardness); – остаточные напряжения (после изготовления или сварки) / residual stresses (after manufacturing or welding); – неметаллические включения (оксиды, сульфиды, алюминаты) / non-metallic inclusions (oxides, sulfides, aluminates); – качество поверхности (шероховатость, дефекты, окалина) / surface quality (roughness, defects, scale); – термическая обработка (нормализация, закалка, отпуск) / heat treatment (normalizing, quenching, tempering); – наличие защитных покрытий (внутренних/наружных) / presence of protective coatings (internal/external)
	Свойства транспортируемого объекта / Properties of the transported object	<ul style="list-style-type: none"> – давление и температура транспортируемой среды / pressure and temperature of the transported environment; – скорость потока и гидродинамические нагрузки / flow rate and hydrodynamic loads; – фазовый состав среды (газ/жидкость/твердые частицы/сверхкритика) / phase composition of the environment (gas/liquid/solid particles/supercritical); – наличие эрозионных компонентов (абразивы, кавитация) / presence of erosive components (abrasives, cavitation)

Окончание таблицы

Table (continued)

Категория Category	Подкатегория Subcategory	Факторы Factors
Конструктивные и эксплуатационные факторы / Design and operational factors	–	– технология изготовления труб (прокатка, сварка, термообработка) / pipe manufacturing technology (rolling, welding, heat treatment); – качество сварных соединений (химический состав шва, ЗТВ) / the quality of the welded joints (chemical composition of the seam); – тип изоляции (внутренние покрытия, наружная изоляция) / type of insulation (internal coatings, external insulation); – условия монтажа (способ прокладки, климатическая зона) / installation conditions (installation method, climate zone); – режим эксплуатации (постоянный/переменный, циклы нагрузки) / operating mode (constant/variable, load cycles); – применение защиты (электрохимическая защита, защитные покрытия) / application of protection (electrochemical protection, protective coatings)

Предложенная систематизация объединяет все три группы факторов в единую схему. Это позволяет учитывать не только влияние химического состава среды и свойств материала, но и эксплуатационные параметры, которые ранее рассматривались отдельно. Практическая ценность заключается в том, что данная статья может быть использована при разработке методик комплексной оценки коррозионной стойкости и степени агрессивности среды и подготовке нормативной документации для выбора материала, технологий защиты и режимов эксплуатации трубопроводов. Выявлены ключевые показатели для прогнозирования коррозии, и предложен подход, учитывающий взаимосвязь металлургических характеристик, среды и эксплуатационных условий. Таким образом, предложенная систематизация обобщает имеющийся опыт и формирует базу для последующей созданию методики.

Выводы

В настоящей работе достигнута цель по систематизации факторов, влияющих на скорость углекислотной коррозии трубопроводов из низколегированных сталей.

В результате исследования выявлено, что существующие отечественные и зарубежные подходы к классификации факторов коррозии носят фрагментарный характер и рассматривают лишь отдельные группы параметров. Предложена систематизация факторов, включающая три категории: внешние, внутренние и конструктивно-эксплуатационные.

Проведенный анализ позволил определить ключевые параметры, критически важные для прогнозирования коррозии и оценки коррозионной стойкости трубопроводов. Предложенный подход обеспечивает комплексную оценку влияния металлургических характеристик, параметров транспортируемой среды и условий эксплуатации на деградацию металла, что

создает основу для оптимального выбора материалов трубопроводов и повышения надежности систем транспортировки неподготовленных углеводородов.

Таким образом, сформированная система факторов может быть использована для разработки методики прогнозирования скорости углекислотной коррозии и оценки агрессивности среды. Оптимальный выбор материального исполнения трубопровода возможен только при учете всех категорий влияния. Последующие исследования будут направлены на разработку методики прогнозирования коррозии и оценки степени агрессивности среды с учетом предложенной систематизации факторов.

Библиографические ссылки

1. Проблемы защиты от коррозии при эксплуатации трубопроводных систем и оборудования нефтегазовой отрасли / К. Н. Абдрахманова, И. А. Дягилев, Н. Х. Абдрахманов, Р. А. Шайбаков // Безопасность техногенных и природных систем. 2020. № 3. С. 39–46. DOI: 10.23947/2541-9129-2020-3-39-46
2. De Waard C., Milliams D.E. (1975) Carbonic acid corrosion of steel. Corrosion, vol. 31, no. 5, pp. 177–181. DOI: 10.5006/0010-9312-31.5.177
3. De Waard C., Lotz U., Milliams D.E. (1991) Predictive model for CO₂ corrosion engineering in wet natural gas pipelines. Corrosion, vol. 47, no. 12, pp. 976–985. DOI: 10.5006/1.3585212
4. Zhao Z., Bakar E.B.A., Razak N.B.A. (2025) An Efficient Corrosion Prediction Model Based on Genetic Feedback Propagation Neural Network. Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 50, pp. 11593–11610. DOI: 10.1007/s13369-024-09522-4
5. Fonseca D. (2024) Carbon Dioxide Corrosion Mechanisms: Historical Development and Key Parameters of CO₂-H₂O Systems [Electronic resource]. International Journal of Corrosion, vol. 2024, no. 1. DOI: 10.1155/2024/5537767
6. Schmitt G., Horstemeier M. (2006) Fundamental Aspects of CO₂ Metal Loss Corrosion. Part II: Influence of Different

Parameters on CO₂ Corrosion Mechanisms [Electronic resource]. NACE International. DOI: 10.5006/C2006-06112

7. Lopez D.A., Perez T., Simison S.N. (2003) The influence of microstructure and chemical composition of carbon and low alloy steels in CO₂ corrosion [Electronic resource]. A state-of-the-art appraisal. *Materials & Design*, vol. 24, no. 8, pp. 561–575. DOI: 10.1016/S0261-3069(03)00158-4

8. Paolinelli L.D., Simison S.N., Perez T. (2007) The influence of steel microstructure, chemical composition and precorrosion on CO₂ corrosion inhibitor efficiency [Electronic resource]. Paper presented at CORROSION, Nashville, Tennessee, March 2007.

9. Xu L.N. (2012) Influence of microstructure on mechanical properties and corrosion behavior of 3% Cr steel in CO₂ environment [Electronic resource]. *Materials and Corrosion*, vol. 63, no. 11, pp. 997–1003 [Electronic resource]. DOI: 10.1002/maco.201106389

10. Ochoa N., Vega C., Pebere N., Lacaze J., Brito J.L. (2015) CO₂ corrosion resistance of carbon steel in relation with microstructure changes [Electronic resource]. *Materials Chemistry and Physics*, vol. 156, pp. 198–205. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2015.02.047

11. Настич С. Ю., Лопаткин В. А. Влияние газообразного водорода на механические свойства металла труб магистральных газопроводов // *Металлург*. 2022. № 6. С. 17–27.

12. Lima dos Santos M. (2024) Influence of centerline segregation region on the hydrogen embrittlement susceptibility of API 5L X80 pipeline steels [Electronic resource]. *Metals*, vol. 14, no. 10, p. 1154.

13. Водородное охрупчивание трубных сталей / Д. А. Пумпянский, И. Ю. Пышминцев, В. М. Хаткевич, А. А. Худнев // *Металлы*. 2023. № 3. С. 36–46.

14. Amaya H. (2016) CO₂ corrosion in oil and gas exploration and production environments [Electronic resource]. *Zairyo-to-Kankyo*, vol. 65, p. 326–332. DOI: 10.3323/jcorr.65.326

15. Rovbo A., Golubev I., Shaposhnikov N., Fedorov A. (2024) Approaches to the selection of material design of infrastructure facilities for transport and injection of CO₂ [Electronic resource]. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, vol. 67, no. 2, pp. 229–236. DOI: 10.17073/0368-0797-2024-2-229-236

16. Shao Q. (2023) Study of repair welding on microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of dissimilar welded joints of SUS304 and Q345B steel [Electronic resource]. *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 23, pp. 4173–4189.

17. Применение внутренних покрытий с целью повышения эффективности транспортировки природного газа и снижения коррозионных повреждений стенки трубопровода / Е. И. Пряхин, В. А. Азаров, А. П. Петкова, С. А. Модестова // *Нефтегазовое дело*. Т. 21, № 6. С. 236–251. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-6-236-251

18. Rao P., Mulky L. (2023) Erosion/Corrosion of Materials in Industrial Equipment: A Review [Electronic resource]. *ChemElectroChem*, vol. 10, no 16, p. e202300152.

19. Li W., Pots B.F.M., Brown B., Kee K.E., Nestic S. (2016) A direct measurement of wall shear stress in multiphase flow – Is it an important parameter in CO₂ corrosion of carbon steel pipelines [Electronic resource]. *Corrosion Science*, vol. 110, pp. 35–45. DOI: 10.1016/j.corsci.2016.04.008

20. Souza R.C. (2022) The influence of rotating cage geometry and baffles on the wall shear stress equation in sweet/sour corrosion [Electronic resource]. *Materials Research*, vol. 25, no. Suppl 1, p. e20210487.

21. Moreira G.P. C. (2024) Evaluation the Propagation of Localized Corrosion Induced by Flow in Different Concentrations of Sodium Chloride and in the Presence of Corrosion

Inhibitor [Electronic resource]. *Materials Research*, vol. 27, no. Suppl 1, p. e20230561.

22. Влияние уксусной кислоты на стойкость к локальной коррозии стали с 13 % хрома в CO₂-содержащих средах / И. Ю. Пышминцев, Е. Р. Мансурова, А. Н. Мальцева, О. В. Вавилова, С. А. Костева, С. И. Котов, С. И. Котов // *Электрохимия*, Т. 61, № 4, С. 200–209.

23. Особенности микроструктуры, фазового состава и возможности упрочнения нержавеющей сталей с 13...17 % Cr / Д. А. Пумпянский, И. Ю. Пышминцев, С. М. Битюков, М. А. Гервасьев, А. А. Гусев // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2022. Т. 65, № 9. С. 644–653. DOI: 10.17073/0368-0797-2022-9-644-653

References

1. Abdrahmanova K.N., Dyagilev I.A., Abdrahmanov N.Kh., Shaibakov R.A. (2020) [Problems of corrosion protection during the operation of pipeline systems and equipment in the oil and gas industry]. *Bezopasnost' tekhnogennykh i prirodnykh sistem*, no. 3, pp. 39–46. DOI: 10.23947/2541-9129-2020-3-39-46 (in Russ.).

2. De Waard C., Milliams D.E. (1975) Carbonic acid corrosion of steel. *Corrosion*, vol. 31, no. 5, pp. 177–181. DOI: 10.5006/0010-9312-31.5.177

3. De Waard C., Lotz U., Milliams D.E. (1991) Predictive model for CO₂ corrosion engineering in wet natural gas pipelines. *Corrosion*, vol. 47, no. 12, pp. 976–985. DOI: 10.5006/1.3585212

4. Zhao Z., Bakar E.B.A., Razak N.B.A. (2025) An Efficient Corrosion Prediction Model Based on Genetic Feedback Propagation Neural Network. *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 50, pp. 11593–11610. DOI: 10.1007/s13369-024-09522-4

5. Fonseca D. (2024) Carbon Dioxide Corrosion Mechanisms: Historical Development and Key Parameters of CO₂-H₂O Systems [Electronic resource]. *International Journal of Corrosion*, vol. 2024, no. 1. DOI: 10.1155/2024/5537767

6. Schmitt G., Horstemeier M. (2006) Fundamental Aspects of CO₂ Metal Loss Corrosion. Part II: Influence of Different Parameters on CO₂ Corrosion Mechanisms [Electronic resource]. *NACE International*. DOI: 10.5006/C2006-06112

7. Lopez D.A., Perez T., Simison S.N. (2003) The influence of microstructure and chemical composition of carbon and low alloy steels in CO₂ corrosion [Electronic resource]. *A state-of-the-art appraisal. Materials & Design*, vol. 24, no. 8, pp. 561–575. DOI: 10.1016/S0261-3069(03)00158-4

8. Paolinelli L.D., Simison S.N., Perez T. (2007) The influence of steel microstructure, chemical composition and precorrosion on CO₂ corrosion inhibitor efficiency [Electronic resource]. Paper presented at CORROSION, Nashville, Tennessee, March 2007.

9. Xu L.N. (2012) Influence of microstructure on mechanical properties and corrosion behavior of 3% Cr steel in CO₂ environment [Electronic resource]. *Materials and Corrosion*, vol. 63, no. 11, pp. 997–1003 [Electronic resource]. DOI: 10.1002/maco.201106389

10. Ochoa N., Vega C., Pebere N., Lacaze J., Brito J.L. (2015) CO₂ corrosion resistance of carbon steel in relation with microstructure changes [Electronic resource]. *Materials Chemistry and Physics*, vol. 156, pp. 198–205. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2015.02.047

11. Nastic S.Yu., Lopatkin V.A. (2022) [Influence of gaseous hydrogen on mechanical properties of transmission gas pipeline steels]. *Metallurg*, no. 6, pp. 17–27 (in Russ.).

12. Lima dos Santos M. (2024) Influence of centerline segregation region on the hydrogen embrittlement susceptibility of

API 5L X80 pipeline steels [Electronic resource]. *Metals*, vol. 14, no. 10, p. 1154.

13. Pumpyansky D.A., Pyshmintsev I.Yu., Khatkevich V.M., Khudnev A.A. (2023) [Hydrogen embrittlement of pipeline steels]. *Metally*, no. 3, pp. 36-46 (in Russ.).

14. Amaya H. (2016) CO₂ corrosion in oil and gas exploration and production environments [Electronic resource]. *Zairyo-to-Kankyo*, vol. 65, p. 326-332. DOI: 10.3323/jcorr.65.326

15. Rovbo A., Golubev I., Shaposhnikov N., Fedorov A. (2024) Approaches to the selection of material design of infrastructure facilities for transport and injection of CO₂ [Electronic resource]. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, vol. 67, no. 2, pp. 229-236. DOI: 10.17073/0368-0797-2024-2-229-236

16. Shao Q. (2023) Study of repair welding on microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of dissimilar welded joints of SUS304 and Q345B steel [Electronic resource]. *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 23, pp. 4173-4189.

17. Pryakhin E.I., Azarov V.A., Petkova A.P., Modestova S.A. (2023) [Application of internal coatings to improve natural gas transportation efficiency and reduce pipeline wall corrosion damage]. *Neftegazovoe delo*, vol. 21, no. 6, pp. 236-251. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-6-236-251 (in Russ.).

18. Rao P., Mulky L. (2023) Erosion/Corrosion of Materials in Industrial Equipment: A Review [Electronic resource]. *ChemElectroChem*, vol. 10, no 16, p. e202300152.

19. Li W., Pots B.F.M., Brown B., Kee K.E., Nescic S. (2016) A direct measurement of wall shear stress in multiphase flow - Is it an important parameter in CO₂ corrosion of carbon steel pipelines [Electronic resource]. *Corrosion Science*, vol. 110, pp. 35-45. DOI: 10.1016/j.corsci.2016.04.008

20. Souza R.C. (2022) The influence of rotating cage geometry and baffles on the wall shear stress equation in sweet/sour corrosion [Electronic resource]. *Materials Research*, vol. 25, no. Suppl 1, p. e20210487.

21. Moreira G.P.C. (2024) Evaluation the Propagation of Localized Corrosion Induced by Flow in Different Concentrations of Sodium Chloride and in the Presence of Corrosion Inhibitor [Electronic resource]. *Materials Research*, vol. 27, no. Suppl 1, p. e20230561.

22. Pyshmintsev I.Yu., Mansurova E.R., Maltseva A.N., Vavilova O.V., Kosteva S.A., Kotov S.I., Kotov S.I. (2025) [Influence of acetic acid on local corrosion resistance of 13% chromium steel in CO₂-containing environments]. *Elektrokhimiya*, vol. 61, no. 4, pp. 200-209 (in Russ.).

23. Pumpyansky D.A., Pyshmintsev I.Yu., Bityukov S.M., Gervasyev M.A., Gusev A.A. (2022) [Features of microstructure, phase composition, and possibilities of strengthening stainless steels with 13...17 % Cr]. *Izvestiya Vuzov. Ferrous Metallurgy*, vol. 65, no. 9, pp. 644-653. DOI: 10.17073/0368-0797-2022-9-644-653 (in Russ.).

Systematization of Factors Influencing the Rate of Carbon Dioxide Corrosion during the Transportation of Untreated Hydrocarbons through Low-Alloy Steel Pipelines

A.S. Rovbo, Post-graduate, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

V.M. Kondratyeva, Post-graduate, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

G.V. Demyanov, Post-graduate, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

V.A. Leventsov, PhD in Economics, Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Improving the reliability of unprocessed hydrocarbon transportation systems remains one of the key challenges in the oil and gas industry, as more than half of pipeline failures are due to CO₂ corrosion. The lack of a unified approach to assessing the factors influencing the rate of CO₂ corrosion complicates material selection and metal degradation prediction. This study is devoted to the analysis of existing classifications of factors determining the rate of CO₂ corrosion in pipelines made of low-alloy steels and to identification the limitations inherent in present-day approaches. Special attention is paid to the comparison of metallurgical characteristics of materials, parameters of the transported medium, and operating conditions, which are interpreted incompletely or fragmentarily in literature. A comprehensive review of domestic and international studies, standards, and corporate methodologies was conducted, and scattered data on chemical, physical, material, and design and operational factors were systematized. Based on this analysis, a classification of factors affecting the rate of CO₂ corrosion during the unprocessed hydrocarbon transportation in low-alloy steel pipelines is proposed, being divided into three categories: external, internal, and design and operational ones. This approach allows for consideration of the interrelations between the medium, material, and operating conditions, which was not previously considered in a unified structure. The main results of the study include the formation of a comprehensive system of factors influencing CO₂ corrosion rate and the identification of key parameters that must be considered when predicting corrosion rates. The proposed classification provides a basis for developing a methodology for comprehensive assessment of corrosion resistance and environmental aggressiveness, as well as for improving mathematical models for corrosion prediction.

Keywords: corrosion resistance, review and systematization of factors, environmental factors, metallurgical factors.

Получено 15.10.2025

Образец цитирования

Систематизация факторов, влияющих на скорость углекислотной коррозии в процессе транспортировки неподготовленных углеводородов по трубопроводам из низколегированных сталей / А. С. Ровбо, В. М. Кондратьева, Г. В. Демьянов, В. А. Левенцов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2026. Т. 29, № 1. С. 4-11. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-1-4-11

For Citation

A.S. Rovbo, V.M. Kondratyeva, G.V. Demyanov, V.A. Leventsov (2026) [Systematization of Factors Influencing the Rate of Carbon Dioxide Corrosion during the Transportation of Untreated Hydrocarbons through Low-Alloy Steel Pipelines]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 29, no. 1, pp. 4-11. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-1-4-11 (in Russ.).