

УДК 620.193.2

Прогноз скорости подземной коррозии стальных трубопроводов. Обзор

М.А. Гаврюшина*, А.И. Маршаков и В.Э. Игнатенко

Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН

**E-mail: maleeva.corlab@yandex.ru*

Аннотация

Задача оценки вероятной скорости коррозии подземных стальных трубопроводов давно стоит перед инженерами и учеными и до сих пор актуальна. В настоящем обзоре рассмотрены факторы, влияющие на процесс образования и развития коррозионных дефектов подземных трубопроводов, и различные методы прогнозирования коррозии трубопроводов. Показаны модели различного типа (детерминистские, вероятностные и созданные с помощью машинного обучения) и проведен анализ критериев их применимости.

Ключевые слова: *малоуглеродистая сталь, модели, состав грунта, вероятная скорость коррозии, методы машинного обучения.*

Поступила в редакцию 9.10.2023 г.; После доработки 9.10.2023 г.; Принята к публикации 9.10.2023 г.

doi: [10.61852/2949-3412-2023-1-4-1-37](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2023-1-4-1-37)

1. Введение

Срок службы подземных стальных конструкций, таких как, трубопроводы, фундаменты, резервуары, определяется во многих случаях скоростью коррозии внешней стенки этих сооружений, контактирующей с грунтом. Наиболее распространенными материалами подземных сооружений, в том числе, трубопроводов различного назначения, являются малоуглеродистые и малолегированные стали (далее – стали). Коррозионное поведение сталей в грунтах или в модельных грунтовых электролитах изучалось многими исследователями и анализу полученных результатов посвящен ряд обзоров, опубликованных в последнее десятилетие [1–3]. Вместе с тем, задача надежного прогнозирования срока службы подземных конструкций далека от своего решения и остается актуальной. Трудность решения этой задачи связана, прежде всего, с тем, что отсутствуют общепринятые методы количественного предсказания скоростей общей и локальной коррозии сталей в грунтах при длительной эксплуатации металлоконструкций.

Число факторов, которые могут влиять на коррозию стальных подземных сооружений, велико, и все факторы не могут быть учтены в прогнозных моделях. Кроме того, коррозия сталей в природных средах (грунте, атмосфере, природных водах) происходит в условиях непрерывного изменения физико-химических параметров коррозионной среды. Изменяются также со временем толщина и барьерные свойства слоя продуктов коррозии на поверхности металла. Могут изменяться и технологические параметры, такие как температура и давление транспортируемого продукта в трубопроводах, режим их электрохимической защиты. Большой риск коррозионного поражения конструкции возникает при протекании в грунтах блуждающих или индуцированных токов от источников постоянного или переменного напряжения. В случае протяженной конструкции, прежде всего трубопроводов, на границе грунтов различного состава или разной степени аэрации возможно образование макро- гальванических пар, действие которых во многом аналогично действию блуждающих токов от источника постоянного напряжения. Значительную опасность представляет коррозия под воздействием продуктов жизнедеятельности микроорганизмов (биокоррозия), которая, как правило, возникает под отслоившимся изоляционным покрытием трубопроводов.

Таким образом, коррозионную систему “трубопровод – грунт” надо рассматривать как “плохо организованную систему”, в которой невозможно установить строго детерминированные причинно-следственные связи между скоростью процесса и многочисленными, изменяющимися во времени и пространстве параметрами. Следовательно, любая прогнозная модель коррозии трубопровода будет иметь вероятностный характер.

Основанием для создания прогнозной модели является база данных, которая состоит из наборов “коррозионный эффект – значения действующих факторов”. В качестве количественного значения коррозионного эффекта наиболее часто используют массу потерю металла или глубину проникновения коррозии, в ряде случаев – площадь или геометрические размеры дефекта, плотность заполнения поверхности дефектами.

Для создания базы коррозионных данных и для разработки прогнозной модели коррозии требуется установить наиболее значимые действующие факторы. Для практического применения модели необходимо, чтобы число этих факторов было ограничено, а их значения (или интервалы изменения этих значений) могли быть определены до или в процессе эксплуатации трубопровода.

Цель настоящей работы – провести обзор существующих прогнозных моделей коррозии внешней стенки подземных трубопроводов. Предварительно будут рассмотрены факторы, влияющие на процессы образования и развития коррозионных дефектов подземной стальной конструкции и, прежде всего, трубопроводов. В обзоре не рассматриваются такие виды коррозии сталей как коррозионное растрескивание

под напряжением и биокоррозия, так как прогнозирование этих специфических видов коррозии сталей требует отдельного обсуждения.

2. Факторы, влияющие на процесс образования и развития коррозионных дефектов подземных стальных трубопроводов

2.1. Коррозия трубных сталей в грунте

Состав и структура стали. В настоящее время считается, что состав и структура стали не входит в число наиболее значимых факторов грунтовой коррозии трубных сталей. В конце 50-х годов прошлого века сотрудниками ИФХ АН СССР под руководством Н.Д. Томашова были проведены полевые испытания углеродистых и низколегированных сталей в шести типах грунта на Звенигородской коррозионной станции и на трассе первого в СССР магистрального газопровода “Москва – Саратов” [4]. По массопотере образцов и с помощью измерений глубины коррозионного дефекта были определены скорости общей и язвенной коррозии и показано, что скорость коррозии определяется не маркой стали, а типом грунта. Было выявлено различие между скоростью коррозии отдельных образцов сталей и контролируемого участка трубопровода, связанное с функционированием пар дифференциальной аэрации, и подтвержден важный для практики вывод: по отношению к протяженным объектам правильно говорить не о коррозионной активности грунта вообще, а о коррозионной активности грунта на каждом определенном участке трассы трубопровода.

В дальнейшем модели почвенной коррозии углеродистой стали разрабатывались без учета химсостава или структуры стали [5]. В принципе, наличие легирующих компонентов может повлиять на защитные свойства продуктов коррозии и, следовательно, на коэффициент торможения коррозии во времени при долговременной экспозиции трубной стали в грунте. В случае достаточно низкого содержания легирующих компонентов в трубной стали, можно ожидать, что такое влияние на величину потери массы металла будет незначительным, как это и наблюдается при атмосферной коррозии углеродистых сталей [6]. Отмечалось, что микроструктура влияет на склонность сталей к локальной коррозии, в частности, микрогальванопары могут возникать между включениями оксидов Mn и металлом–матрицей [3], между ферритом и перлитом [7] и в зоне термической обработки стали [8]. Вместе с тем, влияние микроструктуры трубных сталей нельзя назвать значительным: исследование коррозионного поведения 36 образцов различных трубных сталей в попутно добываемой жидкости на нефтяном месторождении (концентрация ионов Cl^- в данном растворе составляла 18,9 г/л) показало, что средняя скорость локальной коррозии четырех групп сталей варьируется от 4,5 до 6,0 мм/год [7]. Надо отметить, что коррозионные испытания продолжались всего две недели, следовательно, вышеуказанные величины являются

скоростями коррозии на начальной стадии процесса. Результаты испытаний образцов стали X70 производства ХТЗ и Маннесман, которые были проведены в 3-х растворах, моделирующих грунтовый электролит [9], показало, что размер питтингов, образующихся на обеих сталях в одном и том же растворе, отличается незначительно.

Таким образом, в настоящее время отсутствуют надежные экспериментальные данные, на основании которых можно было бы количественно определить влияние химсостава и структуры трубных сталей на скорости их общей и язвенной коррозии при долговременной экспозиции в грунтах.

Остаточные напряжения металла. В настоящее время надежно установлено, что остаточные напряжения металла влияют на зарождение и начальный рост коррозионной трещины в трубной стали [10]. Может быть несколько причин влияния остаточных напряжений на общую и язвенную коррозию сталей:

- остаточные растягивающие напряжения в слое механического наклепа ускоряют электрохимическое растворение железа, в том числе, в области катодных потенциалов [11];
- остаточные напряжения способствуют наводороживанию трубной стали [12], что, в свою очередь, способствует образованию питтингов при катодной или знакопеременной поляризации трубной стали [13] и ускоряет ее анодное растворение в pH -нейтральных электролитах [14];
- биопленка, образующаяся в присутствии сульфатовосстанавливающих бактерий в зоне остаточных напряжений металла, дефектна, что также способствует коррозии трубных сталей [12].

Вместе с тем, действие остаточных напряжений на коррозию трубных сталей в грунтах (грунтовых электролитах) изучено недостаточно. Очевидно, что это влияние будет сильно зависеть от времени экспозиции стали в коррозионной среде, так как направление и величина остаточных напряжений изменяется по толщине стенки трубы [15].

При анализе надежности трубопровода величина остаточных напряжений и размер коррозионного дефекта часто используются как параметры прогнозной модели, например [16, 17]. Однако, подобные модели не требуют установления связи между скоростью коррозии внешней стенки трубы и величиной остаточных напряжений.

Структура и гранулометрический состав грунта. Структура и гранулометрический состав грунта определяют условия водо- и газообмена грунта с внешней средой и являются косвенными характеристиками содержания кислорода в грунте. Кроме того, тип грунта (песок, глина, известняк, лёсс, мергель и т.д.) косвенно характеризует влажность грунта и состав грунтового электролита. В ранних работах предлагалась оценка коррозионной агрессивности грунта по содержанию в нем песка, глины, известняка и гумуса (треугольник Розебома) [5]. Из естественных грунтов наиболее коррозионно-агрессивными являются торфянистые почвы, бедные

известью гумусовые почвы, а также почвы, содержащие мергель и сульфиды, юрский мергель и сланцевые почвы. Как правило, коррозионно-агрессивными являются грунты, загрязненные антропогенными примесями [5]. Некоторые авторы считают наиболее опасными глинистые почвы из-за их способности абсорбировать большое количество воды [2].

Влажность грунта. Влажность грунта характеризует, прежде всего, площадь контакта поверхности стали с грунтовым электролитом. С увеличением влажности площадь этого контакта увеличивается и скорость коррозии возрастает. После заполнения всех пор грунта водой, дальнейшее увеличение влажности может приводить к снижению скорости коррозии из-за уменьшения скорости диффузионного подвода кислорода к поверхности металла [18].

Аэрация грунта. В нейтральных или щелочных грунтах электровосстановление кислорода является основной катодной реакцией при коррозии сталей. В грунтах, так называемой, обратной засыпки концентрация кислорода больше [2], что является одной из причин повышения их коррозионной агрессивности в сравнении с естественными грунтами.

Химический состав грунтового электролита. В число параметров, характеризующих состав грунтового электролита, входит величина pH , буферная емкость (определяемая титрованием щелочью или кислотой), окислительно-восстановительный потенциал, концентрации сульфид– (бисульфид–), хлорид–, сульфат– и карбонат– (бикарбонат–) анионов, концентрации катионов магния и кальция, наличие углеродистых или коксовых компонентов. Были разработаны различные качественные оценки коррозионной агрессивности грунта по различным наборам этих параметров [5, 19–24]. Наиболее полная (балльная) оценка агрессивности грунта дана в стандарте [25].

Удельное электрическое сопротивление грунта. В соответствии с российскими и международными стандартами [21, 25–27] величина удельного электросопротивления грунта (ρ) определяет его коррозионную агрессивность по отношению к сталям. Данная оценка качественная, неоднократно отмечалась слабая корреляция между ρ грунта и скоростью коррозии как образцов стали, так и внешней стенки участков трубопровода [1, 28]. В случае подпленочной коррозии, то есть в отсутствии действия протяженных макропар, оценка коррозионной агрессивности среды только по ρ грунта явно недостаточна.

Средняя плотность катодного тока [26]. Данная оценка коррозионной агрессивности также качественная. Основанием использования этого метода оценки коррозионной агрессивности грунта является то, что коррозия стали в грунтах протекает, как правило, с кислородной деполяризацией и реакция восстановления кислорода лимитируется его диффузионным переносом в жидкой фазе грунта [18]. Метод не учитывает возможность катодного восстановления слабых органических кислот, которые присутствуют в грунтовых водах. Кроме того, значения катодных

токов могут не соответствовать скорости восстановления кислорода из-за протекания реакции восстановления оксидов железа на поверхности электрода или деаэрации грунтового электролита выделяющимся на катоде газообразным водородом. Концентрация кислорода под отслоившимся покрытием, как правило, меньше, чем в околотрубном грунте. Несмотря на указанные недостатки данного метода оценки коррозионной агрессивности грунта, значение катодного тока является единственной величиной, которая может непосредственно характеризовать скорость восстановления кислорода на стали в грунте.

Такие параметры грунта, как его однородность по горизонтали и вертикали [25], имеют большое значение для оценки скорости коррозии стали в сквозном дефекте изоляции трубопровода, но не должны влиять на скорость подпленочной коррозии.

2.2. Коррозия трубных сталей под отслоившимся покрытием

Еще в 70-х годах прошлого века коллективом авторов [29, 30] были выполнены работы по изучению скорости окисления металла под свободной и адгезированной пленками. Показано, что на изолированной поверхности металла торможение анодной реакции ионизации металла более значительно по сравнению с торможением катодных процессов. Вследствие этого в паре, составленной из изолированного и неизолированного металлов, генерируется коррозионный ток, увеличивающий скорость разрушения неизолированного электрода, являющегося анодом коррозионной пары.

Использование станций катодной защиты трубопроводов добавило еще одну составляющую (длительное воздействие катодной поляризации), приводящую к нарушению адгезии в системе “труба-покрытие” – катодное отслаивание. Явление катодного отслаивания интенсивно изучалось. Один из последних обзоров этих исследований дан в [31].

В работе [32] представлен обзор многолетнего изучения механизма внешней коррозии подземных трубопроводов под отслоившимся покрытием со сквозным дефектом или без него. Анализ литературных данных показал, что большинство лабораторных испытаний [33–47] были выполнены при отслоении с равномерным зазором щели. На самом деле, этот параметр редко бывает постоянным и часто изменяется в продольном направлении. Кроме того, ионный ток или диффузия кислорода через проницаемое отслоившееся покрытие также часто не учитывалось, за исключением работ [48, 49].

В более поздней работе [50] автор представил разработанную математическую модель, которая позволяет предсказать коррозию в отслоении со сквозным дефектом с учетом перечисленных выше факторов. Расчетные величины скорости коррозии хорошо согласуются с результатами лабораторных опытов. Результаты моделирования показывают, что в случае работы станции катодной защиты pH подпленочного электролита в области отслаивания с течением времени увеличивается

и скорость коррозии уменьшается. В отсутствии внешней поляризации, но в присутствии кислорода, среднее значение pH раствора в месте отслаивания с течением времени уменьшается и pH раствора в вершине щели становится меньше, чем в устье дефекта. Подкисление электролита под отслоившимся покрытием при отключении катодной поляризации показано также в [51]. В [37, 52] отмечается, что важно знать насколько прокорродировала поверхность трубы до ее изоляции и до включения катодной поляризации, так как ранее образовавшиеся продукты коррозии могут существенно влиять на скорость коррозии под отслоившимся покрытием. Интенсивность локального анодного растворения металла под такой “пленкой”, по мнению авторов, может быть обусловлена влиянием гетерогенности поверхности – наличия механически напряженных участков металла и гальванических пар, возникающих из-за частичного восстановления продуктов коррозии и локального изменения концентрации раствора при протекании катодного тока.

Под отслоившимся покрытием создается благоприятная среда для развития анаэробных микроорганизмов, в частности, сульфат–восстанавливающих бактерий. Продукты жизнедеятельности микроорганизмов изменяют состав подпленочного электролита, увеличивая, как правило, концентрацию сульфид– и карбонатсодержащих соединений [1, 53, 54].

Таким образом, химический состав жидкости под отслоившимся покрытием может значительно отличаться от состава грунтового электролита. Вместе с тем, в настоящее время отсутствуют приемлемые для практики (неразрушающие) методы определения состава электролита под покрытием, поэтому в прогнозных моделях коррозии трубопровода в качестве входных параметров обычно используют свойства грунта или грунтового электролита.

2.3. Влияние технологических параметров на скорость коррозии подземного трубопровода

Давление газа. Основанием для включения величины давления газа в число значимых факторов, влияющих на коррозию трубной стали является механохимический (М–Х) эффект. М–Х эффект проявляется в ускорении анодной и/или катодной реакции под действием растягивающих механических напряжений. Было предложено, что термодинамическая активность металла увеличивается под действием напряжений ε и его равновесный потенциал E_0 сдвигается в отрицательную сторону [55]. Если величина ε пропорциональна давлению газа P , то изменение равновесного потенциала металла описывается как:

$$\Delta E_0 = -\Delta P \cdot \frac{V_m}{zF}, \quad (1)$$

где ΔP – избыточное давление, V_m – мольный объем стали ($7,13 \cdot 10^{-6}$ м³/моль), $z = 2^-$ заряд иона железа, F – константа Фарадея.

Сдвиг E_0 при увеличении ε от нуля до предела текучести составляет несколько мВ, то есть не может привести к заметному ускорению анодной реакции на сталях, что подтверждается экспериментально [56]. Однако слой продуктов коррозии может иметь меньшую прочность, чем предел текучести металла, поэтому при достижении критического значения ε должен происходить разрыв слоя продуктов коррозии и обнажаться поверхность стали. Однако показано, что слой карбоната железа, образующийся на поверхности трубной стали в растворе NS4, не трескается при приложении напряжения в 582 МПа [56]. В результате, потенциал коррозии стали не изменяется, наблюдается незначительное уменьшение поляризационного сопротивления, то есть увеличение скорости коррозии, что объясняют ухудшением барьерных свойств слоя карбоната железа.

При пластической деформации стали величину ΔE_0 предложено описывать как [55]:

$$\Delta E_0 = -\frac{TR}{zF} \cdot \ln\left(\frac{\alpha v \varepsilon_p}{N_0} + 1\right), \quad (2)$$

а при непрерывном упруго–пластическом растяжении как:

$$\Delta E_0 = -\Delta P_m \cdot \frac{V_m}{zF} - \frac{TR}{zF} \cdot \ln\left(\frac{\alpha v \varepsilon_p}{N_0} + 1\right), \quad (3)$$

где ΔP_m – избыточное давление при пластической деформации, равное 1/3 предела текучести стали, коэффициенты $v = 0,45$ и $\alpha = 1,67 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, $N_0 = 10^{-8} \text{ см}^{-2}$ – начальная плотность дислокаций до пластической деформации, ε_p – пластическое напряжение, которое определяется при упруго-пластической симуляции.

Методом конечных элементов были рассчитаны механические напряжения, возникающие при образовании коррозионного дефекта различного размера, и рассчитано изменение потенциала и тока коррозии за счет М–Х эффекта [57, 58]. Экспериментально показано, что при упругой деформации М–Х эффект незначителен ($\Delta E \approx 2$ мВ). При пластической деформации наблюдается сдвиг потенциала на 10 мВ в отрицательную сторону и увеличение тока коррозии на 2 мкА/см² [57]. Возникает гальваническая пара: края дефекта – катод, центр дефекта – анод. Расчет показал, что для стали X100 и дефекта с начальными размерами: глубина 2 мм, ширина 8 мм, скорость растворения железа в центре дефекта возрастает на 0,5 мкА/см² в первый момент времени, но через 20 лет должна увеличиться на 4 мкА/см² [59]. Отмечено, что со временем анодная зона гальванической пары значительно сужается (локализуется в центре дефекта), то есть, М–Х эффект должен приводить к образованию концентратора механических напряжений [57, 58].

Надо отметить недостатки данной модели [57, 58]:

- учитываются только кольцевые напряжения трубопровода;

- связь между скоростью анодного процесса и напряжением задается полуэмпирическим выражением, которое получено для реакции катодного выделения водорода;
- при расчете скорости коррозии не учитывается реакция катодного восстановления кислорода;
- отсутствует экспериментальная систематическая проверка прогнозных величин коррозии при М–Х эффекте, прежде всего, в различных типах грунтового электролита.

Таким образом, несмотря на прогресс в количественном описании М–Х эффекта, заявление авторов [57, 58] о том, что рост коррозионного дефекта со временем эксплуатации трубопровода можно хорошо контролировать с помощью данной модели, является явно преждевременным.

Температура газа. Краткий обзор исследований зависимости скорости коррозии трубных сталей от температуры дан в [60]. Эту зависимость изучали, как правило, в водных растворах или в грунтах с постоянной влажностью [61]. Следовательно, не учитывалась влияние температуры на время существования пленки электролита на поверхности металла. Можно предположить, что зависимость скорости коррозии внешней стенки трубы от ее температуры проходит через максимум. Восходящая ветвь такой зависимости связана с ускорением процесса коррозии с ростом температуры, а нисходящая ветвь – уменьшением времени существования пленки электролита на поверхности металла. Кроме того, связь между температурами газа и внешней стенки трубы зависит как от конструкции трубопровода, так и от условий теплообмена между трубой и внешней средой.

Учитывая, что температура грунта изменяется со временем (дневные и сезонные изменения), представляется целесообразным установить корреляционные зависимости между коррозией и среднегодовыми температурами района эксплуатации для трубопроводов с разными типами покрытий.

3. Методы прогнозирования скорости коррозии стали в грунтах

Оценка скорости коррозии сталей в грунтах является основой для прогнозирования скорости роста коррозионных дефектов внешней стенки подземных трубопроводов. Методы прогноза подземной коррозии стали можно разделить на качественные и количественные [2]. Качественные методы определяют степень коррозионной агрессивности грунта, но не дают численного значения скорости коррозии стали. Количественные методы позволяют численно оценить ожидаемую скорость коррозии металла.

3.1. Качественные методы (методы оценки коррозионной агрессивности грунта)

Качественные методы оценки коррозии сталей используются, главным образом, для определения степени коррозионной активности грунтов на основе ряда их свойств (факторов коррозионной агрессивности). Качественные модели оценки коррозии сталей используются часто в нормативных документах, например, в [26], и определяют коррозионную агрессивность грунта на основании 2–3 факторов. Однако, чем больше факторов учитывает модель при оценке коррозионной агрессивности грунта, тем ее достоверность должна быть выше.

История развития качественных моделей подземной коррозии достаточно подробно описана в [2]. Первоначально использовали только один параметр – удельное электросопротивление грунта ρ . Наиболее широко используемые методы оценки агрессивности грунтов по величине ρ были предложены Национальной ассоциацией инженеров–коррозионистов (NACE) и Американским обществом по тестированию и материалам (ASTM) и обобщены в Таблице 1 [27, 62, 63].

Таблица 1. Оценка коррозионной агрессивности грунта на основании величины его удельного электросопротивления по методикам NACE и ASTM

Сопротивление грунта, Ом·см	NACE	ASTM
>10000	Незначительное влияние	Очень слабо агрессивный
5001–10000	Слабо агрессивный	Слабо агрессивный
2001–5000	Слабо агрессивный	Умеренно агрессивный
1001–2000	Умеренно агрессивный	Сильно агрессивный
501–1000	Агрессивный	Чрезвычайно агрессивный
0–500	Очень агрессивный	Чрезвычайно агрессивный

Для ранжирования грунтов по коррозионной агрессивности использовали также величину окислительно-восстановительного потенциала [64] или pH водной вытяжки грунта [65]. В дальнейшем для оценки агрессивности грунта стали использовать два параметра: удельное сопротивление грунта и pH водной вытяжки (Таблица 2) [21].

Чтобы более полно учесть различные факторы, влияющие на скорость коррозии стали, были разработаны методики оценки грунтов, основанные на бальных шкалах. В этом случае каждый параметр грунта имеет разный вес в зависимости от степени его влияния на коррозию. Были разработаны:

- шкала AWWA C105, которая учитывает влажность и удельное сопротивление грунта, окислительно-восстановительный потенциал, pH водной вытяжки и концентрацию в ней сульфида [22, 23];
- методика DVGW [66],

- стандарт DIN 50 929 [25], который улучшает процедуру DVGW,
- табличный метод оценки коррозионной агрессивности грунта от Dechema [67].

Две последние методики [25, 67] оценивают коррозионную агрессивность грунта по 12 параметрам (Таблица 3).

Таблица 2. Коррозионная агрессивность грунта как функция pH и удельного электросопротивления в согласии с EN 12501-2:2003 [21]

pH	Сопротивление, Ом·см	Уровень коррозии
<3,5	Любое	Высокий
3,5–4,5	<4500	Высокий
	>4500	Выше среднего
4,5–5,5	<4500	Высокий
	4500–5000	Выше среднего
	>5000	Средний
5,5–6,0	<1000	Высокий
	1000–5000	Выше среднего
	5000–10000	Средний
	>10000	Ниже среднего
6,0–9,5	<1000	Высокий
	1000–3000	Выше среднего
	3000–10000	Средний
	10000–20000	Ниже среднего
	>20000	Низкий

На основе метода оценки коррозионной агрессивности грунта AWWA C–105 пытались создать модель “проектного решения” [78]. Суть этой модели заключается в том, что на основе балльной оценки степени агрессивности грунта предлагаются варианты противокоррозионной защиты (тип изоляционного покрытия, необходимость катодной защиты).

Таким образом, по мере накопления знаний о механизме подземной коррозии стали и факторов, которые на нее влияют, качественные методы эволюционировали [2]. В начале, при оценке коррозионной агрессивности грунта принимали во внимание одну или несколько переменных, которые считались наиболее важными. Позже пришло понимание, что скорость коррозии определяется многими факторами и их комбинациями. Балльная шкала позволила улучшить методики ранжирования грунтов по коррозионной агрессивности, и в некоторых случаях создала предпосылки для количественной оценке скорости коррозии. Так, на основе данных стандарта [25] была разработана модель [в процессе патентования],

которая позволяет оценить величины скорости равномерной коррозии и максимальную глубину питтинга на основании величин параметров, приведенных в Таблице 3.

Таблица 3. Переменные, рассматриваемые в Таблице коррозионной агрессивности грунта от Dechema [67] и стандарте [25]

Номер параметра	Название параметра и его размерность
1	Тип грунта
2	Электросопротивление, Ом
3	Содержание воды, %
4	pH
5	Буферная ёмкость
6	Содержание сульфидов, мг/кг
7	Содержание нейтральных солей, моль/кг
8	Содержание сульфатов, моль/кг
9	Наличие грунтовых вод
10	Однородность по горизонтали
11	Однородность по вертикали
12	Окислительно–восстановительный потенциал

3.2. Количественные методы оценки коррозионных потерь трубной стали

Коррозионные повреждения сталей в грунтах обычно оценивают по двум величинам: потере массы металла и максимальной глубине коррозионной язвы (питтинга). Соответственно, рассчитываются скорости условно равномерной коррозии и проникновения коррозии (роста питтинга). Большинство методов количественной оценки скоростей двух видов коррозии основаны на результатах натуральных испытаний образцов сталей или на данных диагностических обследований трубопроводов и других подземных конструкций.

В [1] дан краткий исторический обзор результатов обследований участков трубопроводов, проложенных в грунтах различной коррозионной агрессивности [69–72], однако наиболее полные исследования коррозии сталей в различных типах грунтов были проведены по заказу Национального бюро стандартов США в период с 1922 по 1947 год [73, 74]. При выполнении этой программы тысячи образцов (в основном труб) из различных сортов стали были закопаны в 47 пунктах на территории США на срок до 17 лет. В течение всего периода испытаний образцы извлекались для определения потери массы и максимальной глубины питтингов. Благодаря этому стало возможным определить скорости равномерной и локальной

коррозии стали в течение различных периодов времени. В итоговом отчете М. Романова [74] была показана связь скорости коррозии со свойствами грунтов: установлено, что скорости как общей, так и локальной коррозии уменьшаются со временем по степенному закону.

Можно согласиться с авторами [2], что Романов был ученым, совершившим революцию в области подземной коррозии стали, и большинство последующих исследований лишь подтвердили выводы и рекомендации, содержащиеся в работе [74].

Повторный анализ данных, содержащихся в [74], был выполнен в работе [75]. При этом был отмечен ряд недостатков исследования [74], в том числе:

- плохое статистическое оформление результатов испытаний;
- не учитывались различия в разных горизонтах грунта в одном и том же месте испытаний;
- не учитывались сезонные и годовые изменения некоторых параметров (температура, количество осадков и другие);
- образцы могли быть помещены в грунт на разной глубине, так как не было единой методики подготовки к проведению испытаний;
- использовались нерепрезентативные значения для некоторых переменных, например, бралось их среднее количество за прошлые периоды времени, а не за период испытаний;
- многие свойства грунта были измерены в лаборатории, а не на месте испытаний, в результате чего могла измениться влажность грунта, количество углекислого газа и кислорода, значение pH раствора;
- полный химический анализ был проведен только на 26 из 47 первоначальных испытательных площадок;
- не учитывались возможные изменения характеристик грунта за время испытаний.

Несмотря на установленные ограничения, данные, полученные более 70 лет назад, все еще используются в настоящее время. Более того, по мнению авторов [2], таблицы Романова [74] являются наиболее репрезентативным количественным методом, который учитывает наибольшее число свойств грунта, влияющих на коррозию сталей. Разработанные позже количественные модели учитывают 1–2 фактора коррозионной агрессивности грунта. Так, в работе [76] скорость подземной коррозии стали определялась по величинам pH и минимального удельного сопротивления грунта. В работе [77] была предложена статистическая модель для расчета скорости коррозионной потери стали (V , мм/год):

$$V = 25,4 \cdot (0,000761 \cdot [Cl^-] + 2,52 \cdot pH - 17,2), \quad (4)$$

где $[Cl^-]$ – концентрация хлорид ионов (ppm) в водной вытяжке грунта.

По мнению авторов [78], потеря коррозионной толщины (мм) сваи после 35 лет эксплуатации в грунтах любых типов может быть оценена как

$$25,4 \cdot (1,2964 \cdot pH + 0,0025 \cdot [Cl^-]) \quad (5)$$

или

$$25,4 \cdot (1,5616 \cdot pH), \quad (6)$$

то есть, основным коррозионным фактором является pH грунтового электролита.

В дальнейшем исследования проводились с целью прогноза и количественной оценки коррозии подземных сооружений, прежде всего, трубопроводов; обзор результатов этих работ приведен в разделе 4.

Таким образом, в настоящее время нет количественной модели, которая бы прогнозировала скорость равномерной коррозии (или потерю массы) стали с учетом всех коррозионных факторов, на основании которых дается качественная оценка коррозионной агрессивности грунта.

4. Методы количественной оценки скорости подземной коррозии трубопроводов

Модели коррозии подземных трубопроводов различаются как набором учитываемых в них параметров, так и методами прогнозирования скорости коррозии. Эти модели, главным образом, предсказывают скорость локальной коррозии, которая наиболее опасна при эксплуатации трубопроводов. Модели можно разделить на полуэмпирические, вероятностные и созданные с помощью машинного обучения.

4.1 Полуэмпирические модели

Модель постоянной скорости проникновения коррозии. Данная модель устанавливает постоянную скорость проникновения коррозии на внешней стенке трубы, в согласии с рекомендованной NACE (0,4 мм/год) [79]. Модель не учитывает свойства околотрубного грунта и конструктивные особенности трубопровода. Эта модель является предельным случаем линейных моделей, в которых скорость роста дефекта не зависит от возраста и глубины коррозионного дефекта [80].

4.1.1. Модель изменения глубины коррозионного дефекта по линейному закону

В этой модели постулируется линейная зависимость глубины коррозионного дефекта от времени [81]:

$$d(t) = d_0 + v\Delta t, \quad (7)$$

где $d(t)$ – глубина коррозионного дефекта в момент времени t , Δt – временной интервал, в течение которого протекает коррозионный процесс, d_0 – начальная глубина дефекта, v – скорость коррозии.

Скорость коррозии обычно определяется, по крайней мере, из двух наборов инспекционных данных при диагностике трубопровода [82]:

$$v = \frac{d(t_2) - d(t_1)}{t_2 - t_1}, \quad (8)$$

где $d(t_1)$ – глубина дефекта в момент времени t_1 , $d(t_2)$ – глубина дефекта в момент времени t_2 .

4.1.2. Модель нелинейного изменения глубины проникновения коррозии

В основу этой модели положена степенная зависимость $d(t)$ от времени, установленная в результате натуральных испытаний образцов различных сталей [74]:

$$d(t) = kt^n, \quad (9)$$

где k и n – параметры, определяемые характеристиками грунта и трубопровода.

Затем в течение нескольких десятилетий было предпринято несколько попыток усовершенствовать степенную модель путем нахождения связи между коэффициентами k и n и свойствами грунта. Было предположено, что величина n зависит от степени аэрации грунта: в хорошо аэрируемых грунтах $n=1/6$, а при уменьшении концентрации кислорода n увеличивается и может принимать значения $1/3$, $1/2$ и $2/3$ [83].

На основе данных Романова была найдена эмпирическая зависимость величин k и n (Уравнение (9)) от параметров грунта [84]:

$$\begin{cases} k = 5,74 \cdot (9,9 - pH), pH < 6,8 \\ k = 5,05 \cdot (2pH - 10,3), pH > 7,2 \end{cases} \quad (10)$$

$$n = A_1\theta + A_2CL + A_3, \quad (11)$$

где в уравнении (11) θ – влажность грунта, CL – содержание глины, константы A_i ($i = 1, 2, 3$) зависят от степени аэрации грунта.

Авторы [71] исследовали связь между характеристиками грунта и глубиной питтинга на подземном трубопроводе и отметили значительную корреляцию между максимальной глубиной питтинга и величинами pH , удельного веса грунта и потенциала “труба-земля”. В работе [72] была предложена регрессионная модель, включающая 20 переменных:

$$d_{\max}(t) = \exp\left(\alpha_0 + \sum_{j=1}^p \alpha_j x_j\right) \cdot t^b \quad (12)$$

В (12) входят как величины, обычно используемые для характеристики агрессивности грунта (тип грунта и его электросопротивление, pH водной вытяжки и содержание в ней анионов солей, окислительно–восстановительный потенциал и др.), так и параметры, которых не было ранее в качественных моделях, как то: цвет грунта, разница между пластом срезанной земли и рыхлым грунтом, остаток от выпаривания вытяжки грунта, pH окисленного H_2O_2 грунта и ряд других). Использование в количественной модели таких “необычных” параметров нельзя считать достаточно обоснованным.

В работе [85] была предложена количественная модель оценки скорости коррозии трубопроводов, которая учитывает тип покрытия, состояние покрытия,

возраст покрытия, эффективность катодной защиты (доступность и техническое обслуживание), тип грунта, табличную скорость коррозии для конкретных грунтов и качество инспекций. Это первая модель, которая учитывает при оценке коррозионных повреждений покрытие и катодную защиту. Также эта модель учитывает влияние инструментальной технологии, используемой для обследования трубопровода.

Одной из наиболее известных моделей, основанных на Уравнении (9), является модель, предложенная в [86]. В ней учитывается время до разрушения защитного полимерного покрытия и начала коррозии t_{ini} :

$$d(t) = k(t - t_{ini})^n \quad (13)$$

Скорость роста питтинга определяется как:

$$v(t) = kn(t - t_{ini})^{n-1} \quad (14)$$

Разработка этой модели проводилась на базе данных (БД), полученной в течение 3 лет на трубопроводах в грунтах различного типа [87]. Последние были объединены в 3 группы: глина, суглинок, супесь. Собранная БД состоит из 259 наборов данных. Набор данных включает максимальную глубину питтинга (питтингом считался любой коррозионный дефект, диаметр которого был не больше удвоенной толщины стенки трубы), время экспозиции, тип покрытия, потенциал “труба-земля”, а также свойства грунта: окислительно-восстановительный потенциал, pH , удельное сопротивление грунта, содержание воды, плотность почвы, содержание хлоридов, бикарбонатов и сульфатов. Питтинги определялись на трубопроводе без изоляции и с 4 типами покрытий. Был проведен статистический анализ БД методом многофакторной регрессии, а константы k и n в уравнении (13) были получены как суммы произведений величин факторов на “весовые” коэффициенты. Оказалось, что коэффициент k является функцией окислительно-восстановительного потенциала, сопротивления грунта, pH и концентраций анионов; показатель степени n зависит от потенциала “земля-труба”, содержания воды, плотности грунта и типа покрытия. Получены значения “весовых” коэффициентов для каждого типа грунта и общие для всех грунтов.

Ряд исследователей предлагали другие функциональные зависимости роста глубины питтинга от времени, в частности, в работе [88] было предложено уравнение:

$$d_{\max}(t) = v_p \cdot t + \frac{(v_0 - v_p)}{q_0} \cdot [1 - \exp(-q_0 \cdot t)] \quad (15)$$

где v_0 и v_p – начальная (при $t=0$) и долговременная скорость роста питтинга, соответственно, q_0 – константа регрессии. Долговременная скорость v_p является минимальной средней скоростью роста питтинга и в предлагаемой модели только v_p зависит от свойств коррозионной системы, а именно, от величины pH , сопротивления грунта, окислительно-восстановительного потенциала и потенциала “труба-земля”.

Авторы [88] считают, что их модель преодолела недостатки степенных моделей и позволяет описать рост коррозионных дефектов с большей точностью, даже в течение длительного периода времени. Вместе с тем, надо отметить, что указанная модель не учитывает многие факторы, влияющие на коррозию подземных трубопроводов.

На основе анализа различных эмпирических моделей показано, что рост глубины питтинговой коррозии обладает сильной нелинейностью, а константы регрессии, формулируемые различными факторами, включая свойства грунта и параметры окружающей среды, оказывают значительное влияние на точность модели при прогнозе глубины питтинга [89]. Однако традиционные методы, такие как линейная и нелинейная регрессия, не могут дать точного результата из-за стохастического характера локальной коррозии подземных трубопроводов.

4.2 Вероятностные модели

Поскольку локальная коррозия трубопровода является стохастическим процессом, при построении моделей необходимо учитывать возможность роста дефектов с разной скоростью. При использовании моделей принимаются предположения о статистической однородности данных и о постоянстве условий эксплуатации. Любое систематическое изменение в операционных условиях, температуре или свойствах среды, может ухудшить достоверность вероятностных моделей [90].

Вероятностные методы не противостоят детерминированному подходу, они его дополняют, поскольку позволяют предсказать не только максимальную глубину питтинга, но и распределение питтингов по глубине на выбранном участке трубопровода через определенный интервал времени. Предсказание распределения глубины питтингов имеет решающее значение для разработки моделей надежности и рисков для планирования проверок и технического обслуживания трубопроводов. Так, например, может быть рассчитан показатель надежности трубопровода R [91, 92]. Уменьшение величины R до допустимого уровня надежности показывает необходимость диагностического обследования участка трубопровода. Если известно распределение питтингов по глубине ($f(x)$) в момент времени (t) и распределение вероятностей скорости роста питтинга ($g(v)$), то изменение величины R ко времени ($t + \delta$) определяется как [91, 92]:

$$R(t + \delta) = 1 - \int_{pwt}^{\infty} \int_0^{\infty} g(v) f(x - v\delta) dv dx, \quad (16)$$

где pwt – толщина стенки трубопровода.

Надежность трубопровода уменьшается с увеличением среднего значения и дисперсии распределения скорости питтинговой коррозии [92]. Таким образом, вероятностная модель коррозии трубопровода должна предсказывать распределение скоростей роста питтинга. Рассмотрим наиболее популярные модели локальной

коррозии трубопроводов, полученные с использованием различных статистических методов.

4.2.1 Метод Монте-Карло

Метод Монте–Карло (ММК) является хорошо известным вероятностным параметрическим методом исследования случайных процессов. ММК в “классическом” понимании используется для анализа неопределенностей при детерминированных расчетах, поскольку дает распределение, описывающее вероятность альтернативных возможных значений относительно рассматриваемой точки [90]. Главным ограничением этой модели является то, что математическая модель исследуемого процесса должна быть решена десятки раз, а это требует продолжительного времени [93]. Дискретные случайные числа, генерируемые в этой модели, используются для определения предыдущих значений скоростей коррозии (CR). На Рисунке 1 показана схема генерации дискретных случайных чисел с помощью ММК [93].

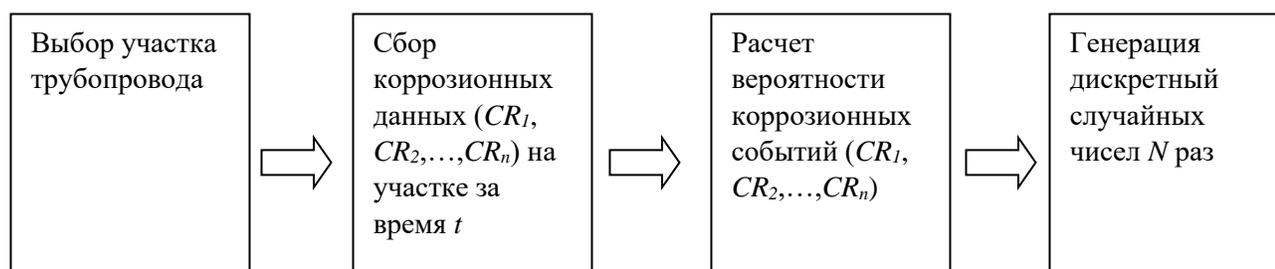


Рисунок 1. Схема генерации дискретных случайных чисел с помощью ММК [93]

В работе [94] с помощью данных о распределении глубины дефектов и времени их инициации был использован ММК для оценки скорости коррозии в подземных трубопроводах. Чтобы добиться такого результата, были использованы случайные числа и введены в алгоритм ММК, основанный на модели их линейного роста. Результаты были очень чувствительны ко времени начала коррозии. Проверка модели на реальных данных позволила получить результат 0,15 – 0,275 мм/год, в то время как скорость коррозии, согласно [95] составляет 0,4 мм/год.

В работе [92] ММК был использован для оценки вероятностных распределений максимальной глубины питтингов и скоростей их роста по степенному закону (Уравнения (13) – (14)). Были использованы эмпирические уравнения, полученные на основе БД Веласкеса [87] и связывающие коэффициенты k и n в Уравнениях (13)–(14) с параметрами грунта и типом покрытия. Полученные с доверительной вероятностью 80% максимальные скорости роста питтинга в грунтах всех категорий (0,087 мм/год) также значительно меньше значения, рекомендованного NACE [95]. Такое различие авторы [92] объясняют тем, что рекомендации NACE основаны на результатах

натурных испытаний стальных образцов без катодной защиты, а БД Веласкеса, получена на трубопроводах в реальных условиях эксплуатации, то есть, с изоляционными покрытиями и под катодной защитой. Было показано хорошее соответствие между предсказанным распределением глубины питтингов на участке трубопровода, протяженностью 82 км, и значениями глубины питтингов, измеренных при проведении внутритрубной диагностики этого участка.

4.2.2. Модель Маркова

Общие принципы и примеры марковских моделей деградации трубопроводов изложены в монографии [96]. Предложена модель роста множества единичных независимых коррозионных дефектов, которая основана на непрерывном во времени марковском процессе чистого рождения [96, 97]. В дальнейшем эта модель была модифицирована и питтинговая коррозия трубопроводов стала рассматриваться как непрерывный во времени неоднородный линейный рост марковского процесса чистого рождения [98], а функция вероятности перехода процесса находится путем сопоставления стохастического среднего значения глубины питтинга со средним значением, полученным в результате моделирования с помощью МКК [92]. В результате была получена связь функции распределения глубины питтингов с параметрами грунта, которые определяют показатель n и время инициации питтинга [98].

Если толщину стенки трубы разделить на N участков (например, размером 0,1 мм), то глубину дефектов можно перевести в единицы состояния Маркова и тогда распределение глубины дефектов можно представить в терминах вероятности $P_m(t_0)$ нахождения в состоянии равном или меньше, чем m , во время t_0 . По Уравнению (17) можно рассчитать вероятность того, что дефект находится в состоянии M ($M \geq m$) во время $t = t_0 + \delta t$ [98]:

$$P_M(t) = \sum_{m=1}^M P_m(t_0) \frac{(M-1)!}{(M-m)!(m-1)!} \left(\frac{t_0 - t_{ini}}{t - t_{ini}} \right)^{nm} \left[1 - \left(\frac{t_0 - t_{ini}}{t - t_{ini}} \right)^n \right]^{M-m} \quad (17)$$

В Уравнении (17) t_{ini} и n задают нелинейное изменение во времени глубины коррозионного дефекта на подземном трубопроводе в соответствии с Уравнением (13), а t_0 соответствует времени наблюдения $p_m(t_0)$ или времени первой инспекции. От возраста дефекта и его глубины зависит не только среднее значение, но форма и дисперсия распределения глубин дефектов.

Уравнение, полученное в [98], описывает распределение скоростей роста питтингов. Это распределение также зависит как от размера, так и от возраста коррозионных дефектов, и такая зависимость отражает нелинейную природу процесса коррозии подземных трубопроводов.

Таблица 4. Достоинства и ограничения различных моделей оценки скорости коррозии трубопроводов [90]

Модель оценки скорости коррозии	Достоинства	Ограничения
Модель постоянной скорости	Детерминистская модель Простота применения	Скорость коррозии постоянна
Модель изменения глубины коррозионного дефекта по линейному закону	Детерминистская модель Простота применения	Необходимо два набора данных обследования трубопровода
Модель нелинейного изменения глубины дефектов	Детерминистская модель Учитывается состав грунта и тип изоляции	Необходимо два набора данных обследования трубопровода
Модель Маркова	Использует подход непрерывного времени. Использует неоднородный линейный рост или подход чистого рождения	Вероятностная модель. Требуется начальное распределение глубины дефектов и параметров грунта-труба
Симуляция Монте-Карло	Анализ неопределенностей детерминистического расчета. Не требует сложного анализа	Длительное вычислительное время. Сложные уравнения
Обобщенное распределение экстремальных значений GEVD. Зависимость от времени	Прогноз распределения дефектов по глубине. Результаты сопоставимы с линейной или Марковской моделью	Вероятностная модель. Подходит для разных типов грунта. Сложные уравнения
Не зависящая от времени GEVD модель (TI-GEVD)	Прогноз распределения дефектов по глубине	Вероятностная модель. Сложные уравнения
Гамма-процесс	Возможность математического анализа. Моноotonно возрастающая	Вероятностная модель. Сложные уравнения
Модель броуновского движения со сдвигом	Рассматривает коррозию как случайный процесс. Может учитывать погрешность измерений	Вероятностная модель. Сложные уравнения

Ряд авторов, например, [91, 99], также предлагали вероятностные модели на основе марковских процессов для оценки скорости развития питтингов при эксплуатации подземных трубопроводов. По мнению авторов [90], модели Маркова

более практичны, чем другие вероятностные модели питтинговой коррозии трубопроводов.

В [82, 90] даны описания еще нескольких вероятностных моделей питтинговой коррозии, как то: зависящая от времени модель обобщенного распределения экстремальных значений (GEVD), не зависящая от времени модель GEVD (TI-GEVD), гамма процесс, модель броуновского движения со сдвигом. В зависимости от типа доступных коррозионных данных используются различные модели оценки скорости коррозии. Поскольку каждая модель имеет свои достоинства и ограничения (Таблица 4), при оценке скорости коррозии трубопроводов используются несколько детерминистских и вероятностных моделей или их комбинация [90].

Надо отметить, что в последние годы продолжается разработка вероятностных моделей, в частности, предложена модель на основе геометрического броуновского моста [100], и все большую популярность приобретает оценка скорости коррозии подземных трубопроводов с использованием методов машинного обучения.

4.3. Методы машинного обучения

В последние годы с развитием возможностей хранения данных и повышением вычислительной мощности для решения различных задач в области коррозии исследователи уделяют большое внимание интеллектуальным алгоритмам, таким как машинное обучение. Машинное обучение позволяет не писать подробных инструкций. Вместо этого закладывается алгоритм самостоятельного нахождения решений путем комплексного использования статистических данных, из которых выводятся закономерности и на основе которых делается прогноз.

Основой моделей машинного обучения являются базы данных. В настоящее время в области подземных коррозионных исследований чаще всего используются базы данных Романова [74] и Веласкеса [87].

Для оценки достоверности предсказаний моделей чаще всего используют следующие статистические критерии:

- Средняя квадратичная ошибка (*MSE*):

$$MSE(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2, \quad (18)$$

где x_i и y_i – экспериментальное и прогнозное значения целевого параметра, соответственно, N – количество объектов в БД. Чем ближе к нулю значение *MSE*, тем лучше модель.

- Корень из среднеквадратичной ошибки (*RMSE*):

$$RMSE(x, y) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}, \quad (19)$$

$RMSE$ – это квадратный корень из MSE . Квадратный корень введен, чтобы масштаб ошибок был таким же, как масштаб целевого показателя.

- Коэффициент детерминации R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{MSE(x, y)}{MSE(x, x_{cp})}, \quad (20)$$

где x_{cp} – среднее экспериментальных значений. R^2 – это соотношение между MSE разработанной модели относительно среднего значения. Величина R^2 лежит в диапазоне от 1 до 0. R^2 идеальной модели стремится к 1, в то время как модель, соответствующая среднему значению, будет давать R^2 равный нулю.

- Средняя абсолютная ошибка (MAE):

$$MAE(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - y_i|, \quad (21)$$

Чем меньше MAE , тем меньше модель ошибается в прогнозе.

В исследовании [101] разработали непараметрическую байесовскую сетевую модель (NPBN) для прогнозирования глубины коррозии подземных трубопроводов с использованием времени эксплуатации трубопровода и свойств грунта. Модель строили на основе БД Веласкеса. NPBN с помощью гауссовой связи даёт зависимость между распределением глубины питтинга и временем эксплуатации трубопровода в совокупности с параметрами грунта. Результаты показывают, что прогнозируемые средние значения глубины питтинга в целом хорошо согласуются с соответствующими полевыми измерениями, и более 95% измеренных глубин находятся в диапазоне от 5 до 95 перцентилей прогнозируемого распределения глубины питтинга.

В работе [102] на основе БД Романова была разработана модель прогноза глубины дефекта с помощью спектрального анализа Байесовской регрессии. Соотношение между входными параметрами модели и откликом (глубина питтинга) было выражено полупараметрически. Неполные записи и выбросы из исходных данных были удалены, а данные нормированы относительно среднего. Исходная информация была разделена на числовую и категориальную. Сложность влияния отобранных факторов на рост глубины дефекта решили за счет допущения, что это влияние можно описать непрерывной функцией. Результирующая модель стала взвешенной суммой отдельных функций, а именно функций, зависящих от времени экспозиции; наличия дренажа; глубины залегания трубопровода; процентного по массе содержания в грунте песка, осадков, глины, коллоидных частиц, взвешенных частиц; средней температуры; количества атмосферных осадков; влажности грунта в объемных процентах; сопротивления, пористости, плотности грунта; объемной усадки; pH грунтового электролита.

Величина R^2 между реальными и прогнозными значениями глубины дефектов составила 0,871. Полученная модель позволяет количественно оценить неопределенность в исходных данных и спрогнозировать глубину коррозионного питтинга.

Часть исследований была сосредоточена на использовании гибридных и метаэвристических алгоритмов [103]. Исследователи [104] представили три гибридных алгоритма на основе БД Веласкеса, которые для прогноза максимальной глубины питтинговой коррозии объединили в себе метод опорных векторов (SVR) с алгоритмами роя частиц (particle swarm) [105, 106], генетическим (genetic) [107] и светлячка (firefly) [108]. Было указано, что гибридный алгоритм SVR-firefly превосходит все другие алгоритмы ($RMSE$ составила 0,2909). Авторы сравнили достоверность моделей машинного обучения и моделей регрессии из работ [86] (Уравнение (13)) и [91] (Уравнение (15)). Все методы машинного обучения показали лучшие результаты (Таблицу 5).

В следующей работе этих же авторов [109] дано описание шести различных типов моделей машинного обучения для прогноза максимальной глубины питтинга (искусственная нейронная сеть (ANN), дерево M5 (M5Tree), многомерные адаптивные регрессионные сплайны (MARS), локально взвешенные полиномы (LWP), модель Кригинга (KR), и нейросеть экстремального обучения (ELM)). Модели были обучены на восьми различных комбинациях признаков из БД Веласкеса. Обнаружено, что для повышения точности прогноза необходимо использовать все 11 параметров коррозионной системы “трубопровод – грунт” в БД Веласкеса. При этом наиболее достоверной оказалась модель Кригинга: $RMSE = 1,15683$, а $MAE = 0,91$ мм. Для оценки моделей был использован также глобальный показатель эффективности (GPI), который позволяет анализировать и ранжировать модели машинного обучения по одному статистическому параметру:

$$GPI = \sum_{j=1}^{11} \alpha_j (I_j^{med} - I_{i,j}^{med}), \quad (22)$$

где I_j^{med} масштабированное значение медианы j -го индикатора (всего 11 индикаторов в этом исследовании), $I_{i,j}^{med}$ - масштабированное значение j -го индикатора для i -ой модели (6 моделей в данной работе). Согласно [110], α_j – это коэффициент, который считается единым для всех статистических показателей, за исключением коэффициента детерминации R^2 ($j=-1$). Модель машинного обучения с наилучшей производительностью – это модель с самыми высокими значениями GPI среди остальных. На основании значений GPI , в качестве лучших названы модели Кригинга и M5Tree со значениями 2,53 и 0,91, соответственно.

В работе [111] на основе базы данных Веласкеса были разработаны модели глубокого обучения (модель ”обобщения” и модель “обобщения–запоминания”),

которые позволяют предсказать максимальную глубину питтинга на подземных газопроводах. Особенностью модели обобщения является связь всех нейронов одного уровня со всеми нейронами следующего уровня. Для модели обобщения – запоминания характерен возврат всех или некоторых данных последнего скрытого слоя обратно на вход. Средне–квадратичная ошибка прогноза глубины питтинга на тестовой базе данных составила 0,0037 мм. Поскольку в использованной БД точность измерения глубины питтинга не более 0,01 мм, то по данным авторов [111] ошибка прогноза модели меньше, чем точность измерений экспериментальных данных. Также разработанные модели авторы сравнили с тремя моделями, представленными в работе [104].

В работе [112] для прогноза максимальной глубины питтинговой коррозии трубопровода предлагается “автоматическое машинное обучение, подкрепленное теорией” (theory-guided automatic machine learning, Tg-AML). В качестве источника данных также использована БД Веласкеса. На первом этапе было сконструировано несколько новых характеристических признаков.

При конструировании новых признаков учитывали некоторые связи между параметрами грунта, обнаруженные в литературе. Соотношение между редокс–потенциалом RP и значением pH было выражено следующим образом [113]:

$$RP = \frac{kB \times T^* \times Ln10}{2e} \times (rH_2 - 2pH), \quad (23)$$

где kB – константа Больцмана, e – элементарный заряд, T^* – абсолютная температура и rH_2 – величина, обратная термодинамической активности молекулярного водорода.

Зависимость между содержанием воды WC и сопротивлением грунта ρ может быть выражена [114]:

$$WC = a \cdot \rho^b, \quad (24)$$

где a и b определяются типом грунта.

Соотношение между ρ и BD может быть выражено как [114, 115]:

$$\log \rho = \alpha + \beta_{DC} DC + \beta_{DS} DS \quad (25)$$

$$DC = \frac{BD_{natural}}{BD_{ref}} \times 100, \quad (26)$$

где DC – степень уплотнения (компактности), BD – объемная плотность, DS – степень насыщения.

Затем на основе корреляционного анализа были разработаны семь различных подмножеств входных параметров, в которые входили значения из основного множества в различных комбинациях.

Наивысшую зависимость признаков с целевой переменной на основе статистических параметров (коэффициент взаимной информации [116] и

коэффициент Пирсона) показал набор, который содержал все 11 признаков из оригинальной базы данных Веласкеса и 7 сконструированных признаков ($RP \cdot pH$, $WC \cdot p$, $WC \cdot BD$, $p \cdot BD$, $\ln(k)$, n , PM).

При разработке моделей использовали такие алгоритмы как регрессия решающего дерева DTR, регрессия опорных векторов SVR, регрессия “случайный лес” RFR, градиентный бустинг GBR, экстремальный градиентный бустинг XGB, искусственная нейронная сеть ANN. В качестве целевого параметра был использован логарифм максимальной глубины питтинга. После получения подходящего подмножества характеристик была создана модель прогнозирования максимальной глубины питтинговой коррозии Tg–AML, которая является ансамблем опробованных алгоритмов. Результаты показывают, что предложенная модель обеспечивает лучшую точность и эффективность, чем другие модели ($RMSE = 0,288$ мм, $MAE = 0,174$ мм). При этом практически все статистические критерии всех исследованных моделей стали лучше после добавления семи дополнительных параметров.

Нужно отметить, что при использовании оригинальных (согласно БД Веласкеса) параметров на входе и одной и той же модели (любой), меньшую ошибку дало предсказание именно логарифма максимальной глубины питтинга.

В Таблице 5 приведена информация об особенностях рассмотренных моделей, использующих методы машинного обучения. Нужно отметить, что сложно сравнивать данные модели друг с другом, поскольку они были получены и опробованы на разных базах данных. Однако результаты тех работ, в которых было проведено сравнение методов машинного обучения и регрессионных моделей, показывают превосходство первых (Таблица 5). При этом хорошо себя показывают ансамблевые модели, состоящие из комбинации различных алгоритмов. Таким образом, методы машинного обучения позволяют делать наиболее точный прогноз интенсивности локальной коррозии подземных трубопроводов.

Таблица 5. Особенности рассмотренных моделей машинного обучения

Источни к	База данных	Целевой параметр	Испытанные модели	Лучшая модель	Статистическ ие параметры
[86]	БД Веласкеса	D_{max}	Нелинейная регрессия	Нелинейная регрессия	$MAE = 1,2165$, $RMSE = 2,3153$, $MSE = 1,1311$ (по данным [104])
[91]	БД Веласкеса	D_{max}	Нелинейная регрессия	Нелинейная регрессия	$MAE = 4,8449$, $RMSE = 5,8525$, $MSE = 37,2137$ (по данным [104])

[101]	БД Веласкеса	Зависимость между распределением глубины питтинга и возрастом трубопровода в совокупности с параметрами грунта	непараметрическая байесовская сетевая модель (NPBN)	непараметрическая байесовская сетевая модель (NPBN)	более 95% значений реальных глубин питтингов находятся в диапазоне от 5 до 95 перцентилей прогнозируемого распределения глубины питтинга
[102]	БД Романова	<i>D max</i>	спектрального анализа Байесовской регрессии	спектрального анализа Байесовской регрессии	$R^2 = 0,871$
[104]	БД Веласкеса	<i>D max</i>	Метод опорных векторов (SVR) с алгоритмами роя частиц (particle swarm), генетическим (genetic) и светлячка (firefly)	гибридный алгоритм SVR-firefly	$MAE = 0,2359$, $RMSE = 0,2909$, $MSE = 0,5588$
[109]	БД Веласкеса	<i>D max</i>	6 ML моделей: ANN, M5 Tree, MARS, LWP, Kriging (KR), and Extreme Learning Machines (ELM)	Сложно выбрать наиболее достоверную модель. Самое низкое значение MAE соответствует модели Кригинга.	$GPI = 2,53$ для модели Кригинга и $GPI = 0,91$ для модели M5Tree
[111]	БД Веласкеса	<i>D max</i>	модель обобщения и модель обобщения-запоминания	модель обобщения	$MSE = 0,0037$ мм, $RMSE = 0,061$ мм, $MAE = 0,0591$ мм

[112]	БД Веласкеса	$\text{Log } D_{\max}$	DTR, SVR, RFR, GBR, XGB, ANN	модель TG-AML. Алгоритм не указан	$RMSE = 0,288$ мм, MAE = 0,174 мм
-------	-----------------	------------------------	---------------------------------	---	---

5. Заключение

Прогноз скорости коррозии внешней стенки подземных трубопроводов является актуальной задачей как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации трубопроводов. Сложность решения этой задачи определяется следующими причинами:

- на электрохимический процесс коррозии трубных сталей в грунтах влияют многочисленные факторы, поскольку грунтовый электролит является многокомпонентной системой, состав которой зависит как от количества воды в грунте (его влажности), так и от химических составов газовой и твердых фаз грунта;
- коррозия трубных сталей происходит в условиях непрерывного изменения физико-химических параметров коррозионной среды, связанного, прежде всего, с суточными и сезонными изменениями параметров окружающей среды;
- время эксплуатации трубопровода и его конструктивные особенности, прежде всего, тип изоляционного покрытия и режим катодной защиты, оказывают сильное влияние на его коррозионное состояние;
- локальная (питтинговая) коррозия сталей является стохастическим процессом, следовательно, коррозия трубопровода также имеет вероятностный характер.

В настоящем обзоре рассмотрены факторы, влияющие на процесс образования и развития коррозионных дефектов подземных трубопроводов, и различные методы прогнозирования коррозии трубопроводов. Основой для прогнозирования скорости роста коррозионных дефектов внешней стенки подземных трубопроводов являются методы предсказания скорости коррозии трубной стали в грунтах, которые можно разделить на качественные и количественные. Качественные методы используются, главным образом, для определения степени коррозионной активности грунтов. Наиболее достоверными качественными методами являются методики оценки коррозионной агрессивности грунтов, основанные на балльных шкалах и учитывающие степень влияния различных свойств грунта на коррозию сталей. Балльные методики представлены в ряде стандартов, например, DIN 50929 (часть 3) [25], согласно которому коррозионная агрессивность грунта оценивается по 12 параметрам. Балльные методики создают предпосылки для количественной оценки скорости коррозии сталей в грунтах. Однако существующие в настоящее время количественные модели подземной коррозии учитывают не более 2 коррозионных факторов, например, величину pH и концентрацию хлорид ионов в водной вытяжке грунта или pH и электросопротивление грунта.

В связи с несовершенством количественного моделирования коррозии сталей в грунтах, методы прогнозирования коррозии внешней стенки трубопроводов основаны на статистической обработке данных, полученных либо при натуральных коррозионных испытаниях образцов трубных сталей (например, база данных Романова [74]) либо при обследовании трубопровода (например, база данных Веласкеса [87]). Модели коррозии подземных трубопроводов различаются способами прогнозирования скорости коррозии, а именно, выделяют детерминистские, вероятностные и созданные с помощью машинного обучения.

Детерминистские модели на основе корреляционно–регрессионного анализа данных предсказывают изменение максимальной глубины коррозионного дефекта, допуская, что скорость роста дефекта постоянна или уменьшается во времени. В последнем случае наиболее часто используют линейную или степенную зависимость скорости коррозии от времени. Некоторые детерминистские модели связывают скорость роста питтинга со свойствами грунта, потенциалом “труба–земля” и типом покрытия трубопровода.

Вероятностные модели дополняют детерминистские, поскольку могут предсказать не только максимальную глубину питтинга, но и распределение питтингов по глубине на выбранном участке трубопровода через определенный интервал времени. При разработке вероятностных моделей наиболее широко применялся метод Монте–Карло и математический аппарат марковских процессов, но использовались и другие методы исследования стохастического процесса локальной коррозии. Поскольку каждая модель имеют свои достоинства и ограничения, при предсказании скорости коррозии трубопроводов рекомендуется использовать комбинацию нескольких детерминистских и вероятностных моделей.

В последние годы широкое распространение получили модели машинного обучения, что связано с накоплением больших баз данных и увеличением производительности компьютерного оборудования. Модели этого типа обучаются на реальных данных и, относительно детерминистских и вероятностных, могут давать более точный прогноз. В дополнение, модели машинного обучения можно объединять в ансамбли, что лучше сказывается на точности предсказания.

6. Список литературы

1. I.S. Cole and D. Marney, The science of pipe corrosion: A review of the literature on the corrosion of ferrous metals in soils, *Corros. Sci.*, 2012, **56**, 5–16. doi: [10.1016/j.corsci.2011.12.001](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.12.001).
2. L. Arriba-Rodriguez, J. Villanueva-Balsera, F. Ortega-Fernandez and F. Rodriguez-Perez, Methods to Evaluate Corrosion in Buried Steel Structures: A Review, *Metals*, 2018, **8**, no. 5, 334. doi: [10.3390/met8050334](https://doi.org/10.3390/met8050334).

3. C. Kim, L. Chen, H. Wang and H. Castaneda, Global and local parameters for characterizing and modeling external corrosion in underground coated steel pipelines: A review of critical factors, *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2021, **1**, no. 1, 17–35. doi: [10.1016/j.jpse.2021.01.010](https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.01.010).
4. Н.Д. Томашов, А.Ф. Лунев, В.В. Красноярский, Ю.Н. Михайловский и В.В. Леонов, *Полевые испытания коррозионной стойкости стали в грунтах. Труды ИФХАН СССР. Исследования по коррозии металлов*, М.: Изд-во АН СССР, 1960, 226–235.
5. И.В. Стрижевский, *Подземная коррозия и методы защиты*, Москва: Металлургия, 1986, 111 с.
6. А.А. Михайлов, Ю.М. Панченко и Ю.И. Кузнецов, *Атмосферная коррозия и защита металлов*, Под общей ред. Кузнецова Ю.И., Тамбов: Изд. Першина Р.В., 2016, 555 с.
7. D. Clover, B. Kinsella, B. Pejicic and R. De Marco, The influence of microstructure on the corrosion rate of various carbon steels, *J. Appl. Electrochem.*, 2005, **35**, no 2, 139–149. doi: [10.1007/s10800-004-6207-7](https://doi.org/10.1007/s10800-004-6207-7).
8. Y. Zhu, Y. Xu, M. Wang, X. Wang, G. Liu and Y. Huang, Understanding the influences of temperature and microstructure on localized corrosion of subsea pipeline weldment using an integrated multi-electrode array, *Ocean Eng.*, 2019, **189**, 106351. doi: [10.1016/j.oceaneng.2019.106351](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106351).
9. А.А. Рыбкина, И.В. Касаткина, Н.А. Гладких, М.А. Петрунин и А.И. Маршаков, Скорости роста локальных коррозионных повреждений трубных сталей в модельных грунтовых электролитах, *Коррозия: материалы, защита*, 2019, no 3, 1–8. doi: [10.31044/1813-7016-2019-0-3-1-8](https://doi.org/10.31044/1813-7016-2019-0-3-1-8).
10. *Коррозионное растрескивание под напряжением труб магистральных трубопроводов. Атлас*, Под общей редакцией А.Б. Аребея и З. Кношински, М.: Наука, 2006, 104 с.
11. А.И. Маршаков, А.А. Рыбкина и Н.П. Чеботарева, Об эффекте аномального растворения металлов: кинетика растворения железа в кислых сернокислых электролитах при катодной поляризации, *Защита металлов*, 1997, **33**, no 6, 590–596.
12. X. Li, F. Xie, D. Wang, C. Xu, M. Wu, D. Sun and J. Qi, Effect of residual and external stress on corrosion behavior of X80 pipeline steel in sulphate-reducing bacteria environment, *Eng. Failure Anal.*, 2018, **91**, 275–290. doi: [10.1016/j.engfailanal.2018.04.016](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.016).
13. Т.А. Ненашева, А.И. Маршаков и И.В. Касаткина, Образование локальных очагов коррозии трубной стали под действием циклической знакопеременной поляризации, *Коррозия: материалы, защита*, 2015, **5**, 9–17.

14. А.И. Маршаков и Т.А. Ненашева, Кинетика активного растворения наводороженной углеродистой стали в сульфидсодержащей среде, имитирующей грунтовый электролит, *Коррозия: материалы, защита*, 2010, **7**, 1–6.
15. Y. Perlovich, O. Krymskaya, M. Isaenkova, N. Morozov, I. Ryakhovskikh and T. Esiev, Effect of Layer-by-Layer Texture Inhomogeneity on the Stress Corrosion of Gas Steel Tubes, *Materials Science Forum*, 2017, 879, 1025–1030. doi: [10.4028/www.scientific.net/MSF.879.1025](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.879.1025).
16. M. Nahal, A. Chateaufneuf and Y. Sahraoui, Reliability analysis of irregular zones in pipelines under both effects of corrosion and residual stress, *Eng. Failure Anal.*, 2019, 98, 177–188. doi: [10.1016/j.engfailanal.2019.01.081](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.081).
17. A. Amirat, A. Mohamed-Chateaufneuf and K. Chaoui, Reliability assessment of underground pipelines under the combined effect of active corrosion and residual stress, *Int. J. Pressure Vessels Piping.*, 2006, **83**, no 2, 107–117. doi: [10.1016/j.ijpvp.2005.11.004](https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2005.11.004).
18. Н.Д. Томашов и Ю.Н. Михайловский, ДАН СССР, 1956, 110, no 6, 1026.
19. A. Rim-Rukeh and J.K. Awatefe, Investigation of soil corrosivity in the corrosion of low carbon steel pipe in soil environment, *J. Appl. Sci. Res.*, 2006, **2**, no 8, 466–469.
20. Z. Ahmad, *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*, Elsevier: Oxford, UK, 2006.
21. EN 12501-2. *Protection of Metallic Materials against Corrosion. CORROSION Likelihood in Soil. Part 2: Low Alloyed and Unalloyed Ferrous Materials; European Standard Store: Pilsen, Czech Republic*, 2003.
22. ANSI/AWWA C105. *Ductile-Iron Pipe Standard; American Water Works Association*, Denver, CO, USA, 2012.
23. P.R. Roberge, *Handbook of Corrosion Engineering*, McGraw-Hill: Columbus, OH, USA, 2000.
24. G. Heim and K.W. Schwen, *Corrosion in Aqueous Solutions and Soil. In Handbook of Cathodic Corrosion Protection, 3rd ed.*, Gulf Professional Publishing: Houston, TX, USA, 1997, 139–152.
25. DIN 50929 part 3. *Probability of corrosion of metallic materials when subject to corrosion from the outside. Buried and underwater pipelines and structural components*, German Institute for Standardization: Berlin, Germany, 1985.
26. ГОСТ 9.602-2005. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии.
27. ASTM G187-12a. *Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Two-Electrode Soil Box Method*, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2012.

-
28. J.P. Busby, D. Entwisle, P. Hobbs, P. Jackson, N. Johnson, R. Lawley, K. Linley, T. Mayr, R. Palmer, M. Raines, H. Reeves, S. Tucker and J. Zawadska, A GIS for the planning of electrical earthing, *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, 2012, **45**, no 3, 379–390. doi: [10.1144/1470-9236/11-023](https://doi.org/10.1144/1470-9236/11-023).
 29. Н.Д. Томашов, Ю.Н. Михайловский и В.В. Леонов, *ЖФХ*, 1961, **35** no 4, 736.
 30. Ю.Н. Михайловский, П.И. Зубов, В.И. Завражина, С.Ф. Наумова, Е.М. Соколова и В.Б. Серафимович, Исследование кинетики коррозии металлов под полимерными покрытиями, *Труды III Международного конгресса по коррозии металлов*, 1968.
 31. M. Xu, C.N. Catherine Lam, D. Wong and E. Asselin, Evaluation of the cathodic disbondment resistance of pipeline coatings – A review, *Prog. Org. Coat.*, 2020, **146**, 105728. doi: [10.1016/j.porgcoat.2020.105728](https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105728).
 32. F.M. Song, A mathematical model developed to predict the chemistry and corrosion rate in a crevice of variable gap, *Electrochim. Acta*, 2011, **56**, no 19, 6789–6803. doi: [10.1016/j.electacta.2011.05.083](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.05.083).
 33. M. Meyer, X. Campaignolle, F. Coeuille and M.E.R. Shanahan, Impact of aging processes on anticorrosion properties of thick polymer coatings for steel pipelines, *Proceedings of the Corrosion/2004 Research Topical Symposium: Corrosion Modeling for Assessing the Condition of Oil and Gas Pipelines*, 2004, 93–146.
 34. R.R. Fessler, A.J. Markworth and R.N. Parkins, Cathodic Protection Levels under Disbonded Coatings, *Corrosion*, 1983, **39**, no 1, 20–25. doi: [10.5006/1.3580809](https://doi.org/10.5006/1.3580809).
 35. T.R. Jack, G.V. Boven, M.J. Wilmott, R.L. Sutherby and R.G. Worthingham, Cathodic protection potential penetration under disbonded pipeline coating, *Mater. Perform.*, 1994, **33**, no 8, 17–21.
 36. A. Turnbull and A.T. May, Cathodic protection of crevices in BS 4360 50D structural steel in 3.5% NaCl and in seawater, *Mater. Perform.*, 1983, **22**, no 10, 34–38.
 37. J.J. Perdomo and I. Song, Chemical and electrochemical conditions on steel under disbonded coatings: the effect of applied potential, solution resistivity, crevice thickness and holiday size, *Corros. Sci.*, 2000, **42**, no 8, 1389–1415. doi: [10.1016/S0010-938X\(99\)00136-5](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(99)00136-5).
 38. M.H. Peterson and T.J. Lennox, A Study of Cathodic Polarization and pH Changes in Metal Crevices, *Corrosion*, 1973, **29**, no 10, 406–412. doi: [10.5006/0010-9312-29.10.406](https://doi.org/10.5006/0010-9312-29.10.406).
 39. A.C. Toncre and N. Ahmad, Cathodic protection in crevices under disbonded coatings, *Mater. Perform.*, 1980, **19**, no 6, 39–43.
 40. M.D. Orton, The effectiveness of cathodic protection under unbonded coatings on pipelines, *Mater. Perform.*, 1985, **24**, no 6, 17–20.
 41. F.M. Song, Predicting the effect of soil seasonal change on stress corrosion cracking susceptibility of buried pipelines at high pH, *Corrosion*, 2010, **66**, no 9, 95004–950014. doi: [10.5006/1.3490309](https://doi.org/10.5006/1.3490309).

-
42. F.M. Song, D.W. Kirk, D.E. Cormack and D. Wong, Barrier properties of two field pipeline coatings, *Mater. Perform.*, 2005, **44**, no 4, 26–29.
 43. F.M. Song, D.W. Kirk, J.W. Graydon and D.E. Cormack, Steel Corrosion under a Disbonded Coating with a Holiday—Part 2: Corrosion Behavior, *Corrosion*, 2003, **59**, no 1, 42–49. doi: [10.5006/1.3277535](https://doi.org/10.5006/1.3277535).
 44. F.M. Song, D.A. Jones and D.W. Kirk, Predicting Corrosion and Current Flow within a Disc Crevice on Coated Steels, *Corrosion*, 2005, **60**, no 2, 145–154. doi: [10.5006/1.3278169](https://doi.org/10.5006/1.3278169).
 45. F.M. Song and N. Sridhar, A Two-Dimensional Model for Steel Corrosion under a Disbonded Coating Due to Oxygen with or without Cathodic Protection—Part 1: Full Numerical Solution, *Corrosion*, 2006, **62**, no 8, 676. doi: [10.5006/1.3278294](https://doi.org/10.5006/1.3278294).
 46. F.M. Song and N. Sridhar, A Two-Dimensional Model for Steel Corrosion under a Disbonded Coating Due to Oxygen with or without Cathodic Protection—Part 2: Model Simplification for Practical Application, *Corrosion*, 2006, **62**, no 10, 873–882. doi: [10.5006/1.3279897](https://doi.org/10.5006/1.3279897).
 47. F.M. Song and N. Sridhar, Modeling pipeline crevice corrosion under a disbonded coating with or without cathodic protection under transient and steady state conditions, *Corros. Sci.*, 2008, **50**, no 1, 70–83. doi: [10.1016/j.corosci.2007.05.024](https://doi.org/10.1016/j.corosci.2007.05.024).
 48. F. King, T. Jack, M. Kolar and R. Worthingham, A permeable coating model for predicting the environment at the pipe surface under CP-compatible coatings, *The 5-th biennial international pipeline conference, IPC 2004: the power of technology*, 2004.
 49. F.M. Song, Simple algorithms for 1D oxygen concentration profile in an occluded region, *Corros. Sci.*, 2008, **50**, no 12, 3287–3295. doi: [10.1016/j.corosci.2008.08.039](https://doi.org/10.1016/j.corosci.2008.08.039).
 50. F.M. Song, Predicting the chemistry, corrosion potential and corrosion rate in a crevice formed between substrate steel and a disbonded permeable coating with a mouth, *Corros. Sci.*, 2012, **55**, no 2, 107–115. doi: [10.1016/j.corosci.2011.10.013](https://doi.org/10.1016/j.corosci.2011.10.013).
 51. M. Yan, J. Wang, E. Han and W. Ke, Local environment under simulated disbonded coating on steel pipelines in soil solution, *Corros. Sci.*, 2008, **50**, no 5, 1331–1339. doi: [10.1016/j.corosci.2008.01.004](https://doi.org/10.1016/j.corosci.2008.01.004).
 52. J.J. Perdomo, M.E. Chabica and I. Song, Chemical and electrochemical conditions on steel under disbonded coatings: the effect of previously corroded surfaces and wet and dry cycles, *Corros. Sci.*, 2001, **43**, no 3, 515–532. doi: [10.1016/S0010-938X\(00\)00103-7](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(00)00103-7).
 53. Q. Cao, T. Pojtanabuntoeng, M. Esmaily, S. Thomas, M. Brameld, A. Amer and N. Birbilis, A Review of Corrosion under Insulation: A Critical Issue in the Oil and Gas Industry, *Metals*, 2022, **12**, no 4, 561. doi: [10.3390/met12040561](https://doi.org/10.3390/met12040561).
 54. M.G. Fontana and R.W. Staehle, *Advances in Corrosion Science and Technology*; Springer Science & Business Media: Berlin, Germany, 2013.
 55. E.M. Gutman, *Mechanochemistry of Materials*, Cambridge: Cambridge Interscience Publishing, 1998.

-
56. L.Y. Xu and Y.F. Cheng, An experimental investigation of corrosion of X100 pipeline steel under uniaxial elastic stress in a near-neutral pH solution, *Corros. Sci.*, 2012, **59**, no 6, 103–109. doi: [10.1016/j.corsci.2012.02.022](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.02.022).
 57. L.Y. Xu and Y.F. Cheng, Development of a finite element model for simulation and prediction of mechano–electrochemical effect of pipeline corrosion, *Corros. Sci.*, 2013, **73**, no 8, 150–160. doi: [10.1016/j.corsci.2013.04.004](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.04.004).
 58. L.Y. Xu and Y.F. Cheng, A finite element based model for prediction of corrosion defect growth on pipelines, *Int. J. Pressure Vessels Piping*, 2017, **153**, no 6, 70–79. doi: [10.1016/j.ijpvp.2017.05.002](https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.05.002).
 59. E.M. Gutman, *Mechanochemistry of Solid Surfaces*, Singapore: World Scientific Publication, 1994.
 60. M. Wasim, S. Shoaib, N.M. Mubarak and A.M. Asiri, Factors influencing corrosion of metal pipes in soils, *Environ. Chem. Lett.*, 2018, **16**, 861–879. doi: [10.1007/s10311-018-0731-x](https://doi.org/10.1007/s10311-018-0731-x).
 61. X.H. Nie, X.G. Li, C.W. Du and Y.F. Cheng, Temperature dependence of the electrochemical corrosion characteristics of carbon steel in a salty soil, *J. Appl. Electrochem.*, 2009, **39**, 277–282. doi: [10.1007/s10800-008-9669-1](https://doi.org/10.1007/s10800-008-9669-1).
 62. A.W. Peabody, *Peabody's Control of Pipeline Corrosion*, NACE International: Houston, TX, USA, 2001.
 63. J. Bhattarai, Study on the corrosive nature of soil towards the buried-structures, *Sci. World J.*, 2013, **11**, no 11, 43–47. doi: [10.3126/sw.v11i11.8551](https://doi.org/10.3126/sw.v11i11.8551)
 64. R.L. Starkey and K.M. Wight, *Anaerobic Corrosion of Iron in Soil: Soil Science*, LWW: Philadelphia, PA, USA, 1946, **62**.
 65. L. Veleva, *Soils and Corrosion (Chapter 32). In Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation, 2nd ed.*, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2005.
 66. *DVGW GW 9:2011. Evaluation of Soils in View of Their Corrosion Behavior towards Buried Pipelines and Vessels of Non–Alloyed Iron Materials; German Technical and Scientific Association for Gas and Water*, Bonn, Germany, 2011.
 67. J. Robinson, *Predicting the In–Ground Performance of Galvanized Steel*, Mount Townsend Solutions Pty Ltd.: Jesmond, Australia, 2005.
 68. *The Design Decision Model for Corrosion Control of Ductile Iron Pipelines*, Ductile Iron Pipe Research Association: Birmingham, AL, USA, 2016.
 69. I.A. Denison and R.B. Darniele, Observations on the behavior of steel corroding under cathodic control in soils, *Trans. Electrochem. Soc.*, 1939, **76**, no 1, 199–214.
 70. G. Doyle, M.V. Seica and M.W.F. Grabinsky, The role of soil in the external corrosion of cast iron water mains in Toronto, Canada, *Can. Geotech. J.*, 2003, **40**, 2, 225–236. doi: [10.1139/t02-106](https://doi.org/10.1139/t02-106).

-
71. F. Kajiya and Y. Koyama, Statistical analyses of field corrosion data for ductile cast iron pipes buried in sandy marine sediments, *Corrosion*, 1997, **53**, no 2, 156–162. doi: [10.5006/1.3280453](https://doi.org/10.5006/1.3280453).
 72. Y. Katano, K. Miyata, H. Shimizu and T. Isogai, Predictive model for pit growth on underground pipes, *Corrosion*, 2003, **59**, no 2, 155–161. doi: [10.5006/1.3277545](https://doi.org/10.5006/1.3277545).
 73. K.H. Logan, *Underground Corrosion, National Bureau of Standards (USA)*, Washington, DC, 1945.
 74. M. Romanoff, *Underground Corrosion, National Bureau of Standards (USA), NBS Circular 579*, Gaithersburg, MD, 1957.
 75. R.E. Ricker, Analysis of Pipeline Steel Corrosion Data from NBS (NIST) Studies Conducted between 1922–1940 and Relevance to Pipeline Management, *Journal of Research (NIST JRES)*, 2010, **115**, no 5, 373–392. doi: [10.6028/jres.115.026](https://doi.org/10.6028/jres.115.026).
 76. R.F. Stratful, A new test for estimating soil corrosivity based on investigation of metal highway culverts, *Corrosion*, 1961, **17**, no 10, 115–118. doi: [10.5006/0010-9312-17.10.115](https://doi.org/10.5006/0010-9312-17.10.115).
 77. J.A. Beavers and C.L. Durr, *Corrosion of Steel Piling in non-Marine Application, report 408 National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board*, National Academy Press, Washington, D.C., 1998.
 78. O.E. Picozzi, S.E. Lamb and A.C. Frank, Evaluation of prediction Methods for Pile Corrosion at the Buffalo Skyway, *New York State Department of Transportation, Technical Service Division, Albany, NY*, 1993.
 79. P. Cazenave and R. Mcnealy, Some consideration in the determination of corrosion growth rates and remaining life from single In–line inspections, 2007.
 80. F. Caleyó, J.M. Hallen, J.L. Gonzalez and F. Fernandez-Lagos, Reliability-based assessment method assesses corroding pipelines, *Oil Gas J.*, 2003, **101**, no 2, 56–61.
 81. M.M. Din, M.A. Ngadi and N.M. Noor, Improving inspection data quality in pipeline corrosion assessment, *International conference on computer engineering and applications*, 2009.
 82. A. Valor, F. Caleyó, J.M. Hallen and J.C. Velazquez, Reliability assessment of buried pipelines based on different corrosion rate models, Mexico, *Corros. Sci.*, 2013, **66**, no 1, 78–87. doi: [10.1016/j.corsci.2012.09.005](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.09.005).
 83. J.R. Rossum, Prediction of pitting rates in ferrous metals from soil parameters, *Journal of American Water Works Association*, 1969, **61**, no 6, 305–310.
 84. S.F. Mughabghab and T.M. Sullivan, Evaluation of the pitting corrosion of carbon steels and other ferrous metals in soil systems, *Waste Management*, 1989, **9**, no 4, 239–251. doi: [10.1016/0956-053X\(89\)90408-X](https://doi.org/10.1016/0956-053X(89)90408-X).
 85. J.M. Race, S.J. Dawson, L. Stanley and S. Kariyawasam, Predicting Corrosion Rates for Onshore Oil and Gas Pipelines, *In Proceedings of the 6th International Pipeline Conference, Calgary, AB, Canada, 25–29 September 2006*, Paper: IPC2006-10261, 385–396. doi: [10.1115/IPC2006-10261](https://doi.org/10.1115/IPC2006-10261).

-
86. J.C. Velazquez, F. Caleyo, A. Valor and J.M. Hallen, Predictive model for pitting corrosion in buried oil and gas pipelines, *Corrosion*, 2009, **65**, no 5, 332–342. doi: [10.5006/1.3319138](https://doi.org/10.5006/1.3319138).
87. J.C. Velazquez, F. Caleyo, A. Valor and J.M. Hallen, Technical note: Field Study – Pitting Corrosion of Underground Pipelines Related to Local Soil and Pipe Characteristics, *Corrosion*, 2010, **66**, no 1, 1–5. doi: [10.5006/1.3318290](https://doi.org/10.5006/1.3318290).
88. J.L. Alamilla, M.A. Espinosa-Medina and E. Sosa, Modelling steel corrosion damage in soil environment, *Corros. Sci.*, 2009, **51**, no 11, 2628–2638. doi: [10.1016/j.corsci.2009.06.052](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.06.052).
89. J. Du, J. Zheng, Y. Liang, N. Xu, Q. Liao, B. Wang and H. Zhang, Deeppipe: Theory-guided prediction method based automatic machine learning for maximum pitting corrosion depth of oil and gas pipeline, *Chem. Eng. Sci.*, 2023, **278**, 118927. doi: [10.1016/j.ces.2023.118927](https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118927).
90. H.R. Vanaei, A. Eslami and A. Egbewande, A review on pipeline corrosion, in-line inspection (ILI), and corrosion growth rate models, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2017, **149**, 43–54. doi: [10.1016/j.ijpvp.2016.11.007](https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.11.007).
91. J.L. Alamilla, E. Sosa, Stochastic modelling of corrosion damage propagation in active sites from field inspection data, *Corros. Sci.*, 2008, **50**, no 7, 1811–1819. doi: [10.1016/j.corsci.2008.03.005](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.03.005).
92. F. Caleyo, J.C. Velazquez, A. Valor and J.M. Hallen, Probability distribution of pitting corrosion depth and rate in underground pipelines: a Monte Carlo study, *Corros. Sci.*, 2009, **51**, no 9, 1925–1934. doi: [10.1016/j.corsci.2009.05.019](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.05.019).
93. J. D. Whiteside II, A practical application of Monte Carlo simulation in forecasting, *AACE International Transactions EST.04.1*, 2008.
94. J.A. Kiefner and K.M.K. Kiefner, Calculation of corrosion rate using Monte Carlo simulation, *NACE corrosion conference*, 2007.
95. *ANSI/NACE Standard RP0502-2002, Pipeline external corrosion direct assessment methodology*, NACE, Houston, Texas, 2002.
96. С.А. Тимашев, А.В. Бушинская, М.Г. Малюкова и Л.В. Полуян, *Целостность и безопасность трубопроводных систем*, НИЦ «НИР БСМ» УрО РАН, 2013, 349–392.
97. S.A. Timashev, M.G. Malyukova, L.V. Poluian and A.V. Bushiskaya, Markov description of corrosion defects growth and its application to reliability based inspection and maintenance of pipelines, in: *Proc. 7th ASME Int. Pipeline Conf. IPC2008, Calgary, Canada, Paper IPC2008-64546*, 2008, September 26–29.
98. F. Caleyo, J.C. Velazquez, A. Valor and J.M. Hallen, Markov chain modelling of pitting corrosion in underground pipelines, *Corros. Sci.*, 2009, **51**, 2197–2207. doi: [10.1016/j.corsci.2009.06.014](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.06.014).

-
99. H. Hong, Inspection and maintenance planning of pipeline under external corrosion considering generation of new defects, *Structural Safety*, 1999, **21**, no 3, 203–222. doi: [10.1016/S0167-4730\(99\)00016-8](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(99)00016-8).
 100. H. Wang, A. Yajima and H. Castaned, A stochastic defect growth model for reliability assessment of corroded underground pipelines, *Process Saf. Environ. Prot.*, 2019, **123**, 179–189. doi: [10.1016/j.psep.2019.01.005](https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.005)
 101. W. Xiang, W. Zhou, A Nonparametric Bayesian Network Model for Predicting Corrosion Depth on Buried Pipelines, *Corrosion*, 2020, **76**, no 3, 235–247. doi: [10.5006/3421](https://doi.org/10.5006/3421).
 102. N. Balekelayi and S. Tesfamariam, External corrosion pitting depth prediction using Bayesian spectral analysis on bare oil and gas pipelines, *Int. J. Pressure Vessels Piping*, 2020, **188**, article: 104224. doi: [10.1016/j.ijpvp.2020.104224](https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104224).
 103. С.Н. Яшин, Н.И. Яшина, Е.В. Кошелев и А.А. Иванов, *Метаэвристические алгоритмы в управлении инновациями: Монография*, Нижний Новгород: ООО “Печатная Мастерская Радонеж”, 2023, 200 с.
 104. M. El A. Ben Seghier, B. Keshtegar, K.F. Tee, T. Zayed, R. Abbassi and N.T. Trung, Prediction of maximum pitting corrosion depth in oil and gas pipelines, *Eng. Failure Anal.*, 2020, 112, article: 104505. doi: [10.1016/j.engfailanal.2020.104505](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104505).
 105. R. Eberhart and J. Kennedy, Particle swarm optimization, *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, 4, *IEEE*, 1995, 1942–1948. doi: [10.1109/ICNN.1995.488968](https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968).
 106. R. Eberhart, J. Kennedy, A new optimizer using particle swarm theory, *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, *IEEE*, 1995, 39–43. doi: [10.1109/MHS.1995.494215](https://doi.org/10.1109/MHS.1995.494215).
 107. M. Kumar, M. Husian, N. Upreti and D. Gupta, Genetic algorithm: review and application, *International Journal of Information Technology and Knowledge Management*, 2010, **2**, 451–454. doi: [10.2139/ssrn.3529843](https://doi.org/10.2139/ssrn.3529843).
 108. X. Yang, Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimization, *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 2010, **2**, no 2, 78–84. doi: [10.1504/IJBIC.2010.032124](https://doi.org/10.1504/IJBIC.2010.032124).
 109. M.El A. Ben Seghier, B. Keshtegar, M. Taleb-Berrouane, R. Abbassi and N. Trung, Advanced intelligence frameworks for predicting maximum pitting corrosion depth in oil and gas pipelines, *Process Saf. Environ. Prot.*, 2021, **147**, 818–833. doi: [10.1016/j.psep.2021.01.008](https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.008).
 110. M. Despotovic, V. Nedic, D. Despotovic and S. Cvetanovic, Review and statistical analysis of different global solar radiation sunshine models, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2015, **52**, 1869–1880. doi: [10.1016/j.rser.2015.08.035](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.035).
 111. B. Akhlaghi, H. Mesghali, M. Ehteshami, J. Mohammadpour, F. Salehi and R. Abbassi, Predictive deep learning for pitting corrosion modeling in buried transmission pipelines, *Process Saf. Environ. Prot.*, 2023, 174, 320–327. doi: [10.1016/j.psep.2023.04.010](https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.04.010).

112. J. Du, J. Zheng, Y. Liang, N. Xu, Q. Liao, B. Wang and H. Zhang, Deeppipe: Theory-guided prediction method based automatic machine learning for maximum pitting corrosion depth of oil and gas pipeline, *Chem. Eng. Sci.*, 2023, **278**, article: 118927, doi: [10.1016/j.ces.2023.118927](https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118927).
113. O. Husson, B. Husson, A. Brunet, D. Babre, K. Alary, J.–P. Sarthou, H. Charpentier, M. Durand, J. Benada and M. Henry, Practical improvements in soil redox potential (Eh) measurement for characterisation of soil properties. Application for comparison of conventional and conservation agriculture cropping systems, *Anal. Chim. Acta*, 2016, **906**, 98–109. doi: [10.1016/j.aca.2015.11.052](https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.11.052).
114. L.B.B. de Melo, B.M. Silva, D.S. Peixoto, T.P.A. Chiarini, G.C. de Oliveira, N. Curi, Effect of compaction on the relationship between electrical resistivity and soil water content in Oxisol, *Soil Tillage Res.*, 2021, **208**, article: 104876. doi: [10.1016/j.still.2020.104876](https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104876).
115. A.W. Al–Kayssi, Use of water retention data and soil physical quality index S to quantify hard-setting and degree of soil compactness indices of gypsiferous soils, *Soil Tillage Res.*, 2021, **206**, article: 104805. doi: [10.1016/j.still.2020.104805](https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104805).
116. Н.К. Верещагин, Е.В. Щепин, *Информация, кодирование и предсказание*, М.: ФМОП, МЦНМО, 2012, 238 с.

Forecast of the rate of underground corrosion of steel pipelines. Review

M.A. Gavryushina*, A.I. Marshakov and V.E. Ignatenko

*A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry,
Russian Academy of Sciences, Leninsky pr. 31, 119071 Moscow, Russian Federation*

*E-mail: maleeva.corlab@yandex.ru

Abstract

The task of estimating the probable corrosion rate of underground steel pipelines has long been facing engineers and scientists and is still relevant. This review examines the factors influencing the formation and development of corrosion defects of underground pipelines, and various methods for predicting corrosion of pipelines. Models of various types (deterministic, probabilistic and created using machine learning) are shown and the criteria of their applicability are analyzed.

Keywords: *low-carbon steel, models, soil composition, probable corrosion rate, machine learning methods.*