

С. В. Умбетов, С. П. Пронин

**КЛАССИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ
КОРРОЗИЙНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ПОДЗЕМНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТРУБОПРОВОДА**

В данной работе представлена классификация коррозионных повреждений внутренней поверхности трубопровода, сравнительная характеристика влияния коррозионных повреждений на внутреннюю поверхность металлических труб. Наибольшее распространение на внутренних поверхностях металлического трубопровода получили язвенная, точечная, межкристаллитная, растрескивающая, питтинговая, щелевая и сквозная коррозии. Приведены методы и средства контроля коррозионных повреждений, выполнен анализ их возможностей. Показано, что развитие диагностики внутренней поверхности трубопроводов идет по пути создания робототехнических средств. Существующие робототехнические устройства на сегодняшний день имеют недостатки. Во-первых, при некоторых повреждениях необходимо присутствие оператора в месте прохождения трубопровода, что не исключает субъективной диагностики. Во-вторых, как правило, методы требуют аварийных раскопок. В-третьих, являются узконаправленными, не позволяют диагностировать все виды коррозионных повреждений в целом. В заключении предложен модульный робототехнический комплекс, который объединяет в себе ряд функций, исключая эти недостатки.

Ключевые слова: коррозия, повреждение, металл, трубопровод, магистраль, методы контроля, средства контроля.

S. V. Umbetov, S. P. Pronin

**CLASSIFICATION AND ANALYSIS OF INSTRUMENTS
FOR MEASURING CORROSION DAMAGE TO INTERNAL SURFACES
OF UNDERGROUND METAL PIPELINE**

This paper presents a classification of corrosion damage to the inner surface of the pipeline, a comparative description of the effect of corrosion damage on the inner surface of metal pipes. The most common on the inner surfaces of a metal pipeline are ulcerative, pitting, intergranular, cracking, pitting, crevice and through corrosion. Methods and tools for controlling corrosion damage are presented, and their capabilities are analyzed. It is shown that the development of diagnostics of the inner surface of pipelines is on the path to creating robotic tools. Existing robotic devices today have disadvantages. Firstly, for some injuries, the presence of an operator at the place of passage of the pipeline is necessary, which does not exclude subjective diagnostics. Secondly, as a rule, methods require emergency excavations. Thirdly, they are narrowly targeted, they do not allow to diagnose all types of corrosion damage in general. In conclusion, a modular robotic complex is proposed, which combines a number of functions that exclude these shortcomings.

Key words: corrosion, damage, metal, pipeline, highway, control methods, means of control.

Введение

Для определения степени опасности, оценки возможности и сроков безопасной эксплуатации трубопроводных магистралей с заданными параметрами уровня надежности примени-

тельно к большинству магистральных трубопроводов, подверженных коррозии, актуальна задача классификации коррозионных повреждений внутренних поверхностей.

Исходя из уровня изначальной защиты металлического трубопровода от воздействия различных факторов окружающей среды и агрессивности этого воздействия, можно определить коррозионное состояние металлического трубопровода. Любое воздействие окружающей среды на поверхность трубопровода изменяется не только от природно-климатических условий, но и от иных дополнительных факторов опасности, таких как разрастание различных видов коррозии, давление грунта и строений на трубопровод, химический состав вод и стоков, блуждающие токи [1; 2].

При изменении степени воздействия различается и скорость роста коррозионных повреждений. Это воздействие может колебаться от 0,25 до 1,5 мм/год в зависимости от региона России. Такую скорость разрушения трубопровода значительной не назовешь, поэтому основную опасность представляет собой внутренняя коррозия, скорость разрушения которой может превышать внешнюю коррозию в несколько раз и достигать до 10 мм/год [3; 4].

Цель работы: классифицировать наиболее частые и возможные коррозионные повреждения, выполнить аналитический обзор известных методов обнаружения коррозии на внутренней поверхности трубопровода и обозначить функции перспективного средства контроля поверхности трубопровода.

Своевременное обнаружение повреждений, их анализ и оперативное их устранение позволят решить проблему прогнозирования износа труб, их своевременную замену или ремонт.

Постановка задачи: виды коррозии

Трубопроводы всегда были и будут объектом коррозии. Коррозионный процесс зависит от многих факторов, но всегда происходит в коррозионной системе, которая состоит из объекта коррозии – металла и коррозионной среды – вещества. В итоге происходит потеря механической прочности металла – коррозионное разрушение. Коррозионные повреждения внутренней поверхности трубопроводов всегда присутствуют в системах горячего и холодного водоснабжения, в канализационных системах. Поэтому для того, чтобы понимать, каким образом можно более точно и с минимальными затратами диагностировать коррозионные повреждения, рассмотрим более подробно коррозионные изменения, образуемые на внутренней поверхности водопроводных и канализационных труб, а также методы их обнаружения.

Существует несколько видов определения коррозии, однако общепринятым считается определение коррозии как разрушение металла в результате электрохимического или химического взаимодействия с коррозионной средой. В нашем случае речь идет не просто о коррозии металлов, а о коррозии трубопроводных магистралей. Металл в таких магистралах, представляет собой линейно-трубную сталь, которая в большей своей части состоит из железа со сплавом до 2 % [5].

Классифицировать коррозию принято по механизму, условиям протекания процесса и характеру разрушения.



Рисунок 1 – Электрохимическая коррозия: $4Fe^{2+} + 6H_2O + 4e = 4Fe(OH)_3$

Внутреннюю коррозию по механизму протекания можно классифицировать на электрохимическую (рис. 1) и химическую (рис. 2).



Рисунок 2 – Химическая коррозия: $4\text{Fe} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3$

Основным фактором, ухудшающим состояние внутренней поверхности труб, является реакция ионов железа с водой и кислородом и, как следствие, образование коррозионного выпадения – ржавчины или иного оксида железа (электрохимическая коррозия) [6]. Выглядит это так. При взаимодействии металла с водой и кислородом ионы металла переходят в раствор. В результате происходит реакция окисления – анодная реакция. На катоде же происходит реакция восстановления. Коррозия металла происходит именно на аноде. Но в некоторых случаях ионы железа могут реагировать и с углеродом, и с сероводородом, в результате чего образуется карбонат железа или сульфида железа, который выделяется в виде осадка. При электрохимической коррозии все процессы коррозионных изменений сопровождаются образованием электрического тока. Кроме того, происходят одновременно оба процесса – восстановительный и окислительный [1].

Химическая коррозия происходит при непосредственном химическом взаимодействии металла с агрессивной средой и, в отличие от электрохимической, протекает в средах, не проводящих электрический ток [1]. Продукты коррозии образуются непосредственно при взаимодействии металла и агрессивной среды.

Коррозию по условиям протекания можно классифицировать на следующие виды:

1. Жидкостная коррозия – вид коррозии металла в жидкой среде. Этот вид коррозии подразделяется на коррозию в электролитах (процессы происходят в кислотных средах) и неэлектролитах, когда процессы происходят в жидкостях, не проводящих электрический ток.

2. Биокоррозия – вид коррозии, связанной с разрушением поверхности металла под влиянием живых микроорганизмов [7]. В случае микробиологической коррозии имеет значение восстановление сульфатов до сульфидов (анаэробные бактерии, обычно обитающие в сточных водах) [8]. В результате их деятельности образуется сероводород H_2S , который хорошо растворяется, например, в нефти, и, взаимодействуя с железом, образует сульфид железа, выпадающий в осадок: $\text{Fe} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{FeS} + \text{H}_2$ [9]. Под воздействием сероводорода поверхность легко смачивается водой, и на ней образуется тонкий слой электролита, в котором и происходит накопление сульфида железа. А сульфид железа, участвуя в образовании гальванической микропары $\text{Fe}-\text{FeS}$, является катодом, следовательно, железо будет разрушаться как анод. Ряд ионов, в том числе и ионы хлора, активируют металлы. Ионы хлора имеют высокую абсорбируемость на металле. Они способствуют растворению пассивирующих пленок и облегчают переход ионов металла в раствор. Биокоррозию классифицируют на микробиологическую и бактериальную, а микроорганизмы – на аэробные, которые существуют и размножаются только при наличии кислорода, и анаэробные, для жизнедеятельности которых кислород не требуется. Биокоррозия является одной из наиболее разрушительных коррозий исходя из того, что бактерии очень быстро размножаются и приспосабливаются к любым изменениям окружающей среды. Однако чаще всего микроорганизмы стимулируют коррозионный процесс, но могут и разрушать.

3. Структурная коррозия – вид коррозии, связанной с неоднородностью структуры металлов [1].

4. Коррозия блуждающими токами – вид электрохимического разрушения, которое происходит под воздействием блуждающих токов. Например, в результате работы трамвайных линий, электрических железных дорог происходит частичная утечка тока, который блуждает по грунту и находящимся в нем металлическим сооружениям.

5. Коррозия под напряжением – это разрушение металла при одновременном воздействии механических напряжений и агрессивной среды. Механическое напряжение проявляется посредством давления грунта, наземных построек на места прохождения теплотрасс, канализаций и водопроводов. Поэтому исходя из характера нагрузок можно выделить коррозию при постоянных (постоянное давление) и переменных (непостоянное) нагрузках.

Коррозийные повреждения по типу имеют следующую классификацию:

1. Сплошная коррозия, которая подразделяется на равномерную и неравномерную.

Равномерная, или общая, коррозия – это коррозия, равномерно распределенная по поверхности металла. Такая коррозия приводит к одинаковому утончению толщины труб.

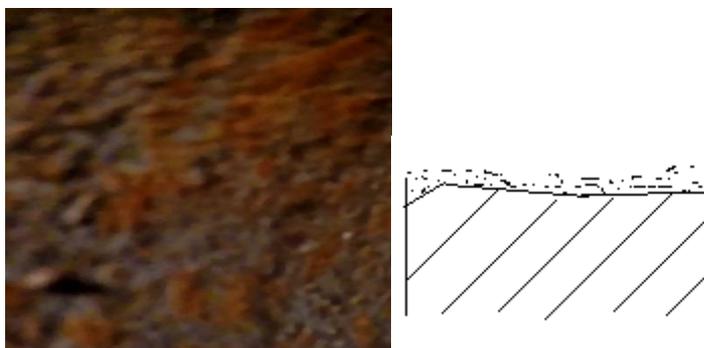


Рисунок 3 – Равномерная коррозия поверхности металла

Неравномерная коррозия (рис. 4) – коррозия, охватывающая только определенную часть поверхности трубы.

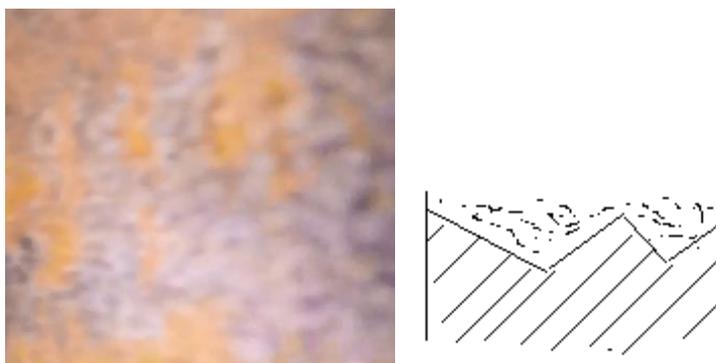


Рисунок 4 – Неравномерная коррозия поверхности металла

2. Местная, или локальная, коррозия – это коррозия, сосредоточенная на отдельных участках поверхности. Такую коррозию можно разделить на несколько видов:

- в виде пятен (рис. 5). Поражение распространяется сравнительно неглубоко и занимает относительно большие участки поверхности;



Рисунок 5 – Коррозия поверхности металла в виде пятен

- в виде язв (рис. 6). Коррозия протекает на небольших участках поверхности в форме локальных поражений. Опасность ее заключается в разрушении металла при незначительной потере общего веса. Поражение занимает небольшие участки поверхности, и обнаружить его сложнее, чем сплошную коррозию, что в дальнейшем может привести к образованию свища.

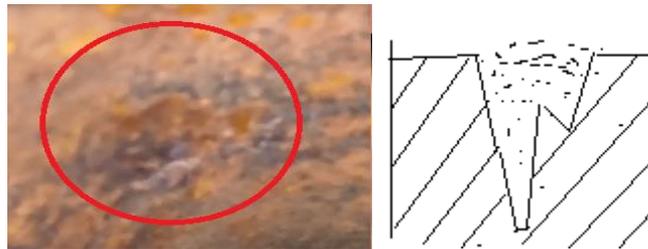


Рисунок 6 – Коррозия поверхности металла в виде язв

Иногда можно наблюдать язвы, похожие на ручейки или канавки. Они образуются в участках скопления электролита. Хотя это и язвенное поражение, но иногда его называют ручейковым или канавочным;

- в виде точек (питтинговая, рис. 7). Размеры точек еще меньше язвенных разъединений.

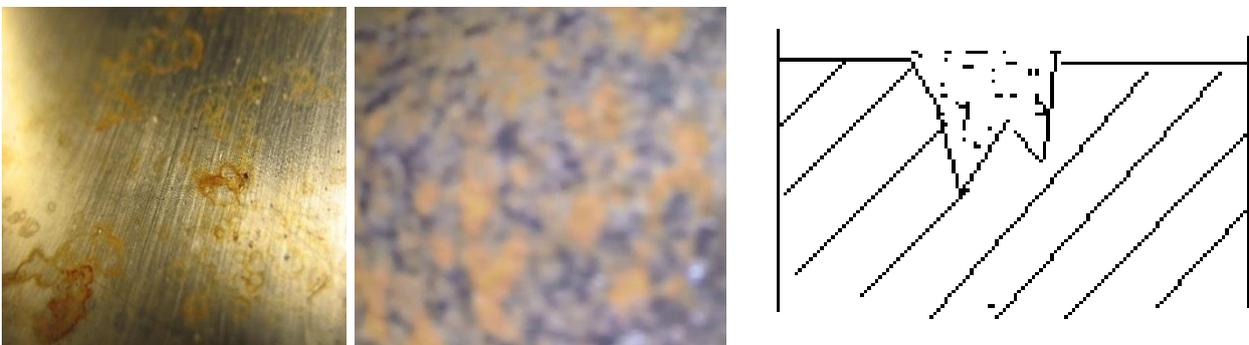


Рисунок 7 – Коррозия поверхности металла питтинговая

В свою очередь, питтинговую коррозию можно подразделить по размеру на:

- питтинговую коррозию до 0,1 мм – микропиттинг;
- питтинговую коррозию от 0,1 до 1 мм;
- питтинговую коррозию свыше 1 мм.

Питтинги бывают открытыми, закрытыми и поверхностными. Закрытые питтинги нельзя увидеть невооруженным глазом, определить его можно только специальным оборудованием. Развивается такой питтинг вглубь металла. Открытый питтинг, наоборот, очень хорошо виден под небольшим увеличением или даже невооруженным глазом. Когда таких повреждений много, коррозия уже носит сплошной характер.

Поверхностный питтинг развивается не вглубь металла, а вширь и в дальнейшем образует выбоины в виде:

- сквозной коррозии (рис. 8). Сквозная коррозия – это коррозионное повреждение, происходящее вглубь металла. В результате образует сквозное отверстие [10];

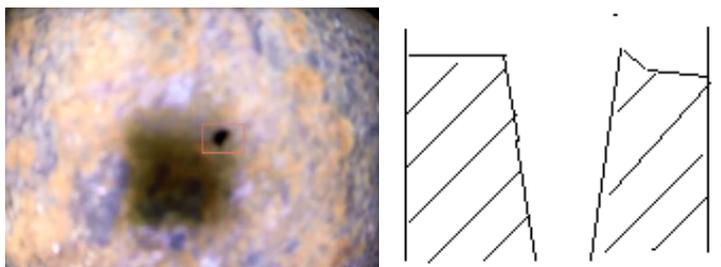


Рисунок 8 – Коррозия поверхности металла сквозная

- межкристаллитной коррозии (рис. 9). Межкристаллитная коррозия характеризуется разрушением металла по границам кристаллитов (зерен металла). Процесс разрушения протекает глубоко и быстро. В результате металл теряет свою прочность;



Рисунок 9 – Коррозия поверхности металла межкристаллитная

- избирательной коррозии. Образуется под воздействием агрессивной среды, избирательно растворяется один или несколько компонентов сплава, используемого при изготовлении трубы, после чего остается пористый остаток, который сохраняет первоначальную форму и на первый взгляд кажется неповрежденным;
- коррозионного растрескивания (рис. 10). Коррозионное растрескивание происходит тогда, когда металл подвергается постоянному растягивающему напряжению в коррозионной среде. Коррозионное растрескивание может быть вызвано абсорбцией водорода, образовавшегося в процессе коррозии;



Рисунок 10 – Коррозионное растрескивание

- щелевой коррозии (рис. 11). Данный вид коррозии характеризуется усиленным разрушением в местах неплотного соединения однородных металлов под прокладками, в больших зазорах, клепанных и резьбовых соединениях [11].



Рисунок 11 – Щелевая коррозия металлической поверхности

Обсуждение результатов: новые приборы и методы контроля

Все рассмотренные выше коррозионные повреждения, независимо от условий их протекания и видов, наносят огромный вред внутренним поверхностям трубопроводов, поэтому для того, чтобы обеспечить надежность и функционирование, требуется максимально точная диагностика состояния внутренних поверхностей трубопроводов и, соответственно, максимально точный прогноз работоспособности всей системы. Особенно актуальна диагностика трубопроводов, которые находятся в эксплуатации длительный отрезок времени. Своевременная и точная диагностика позволит обеспечить увеличение срока службы трубопроводов, его безаварийную эксплуатацию, снизить количество повреждений, уменьшить затраты на ремонтные работы.

Безусловно, в целях определения технического состояния трубопроводов магистрали регулярно подвергаются техническому освидетельствованию [9; 12–14]. Проводится наружный осмотр трубопровода, если он пролегает над землей, и мест пролегания трубопровода под землей. Задача осмотра, если трубопровод пролегает под землей, – установить наличие обвала грунта, нетипичных подтоплений, воды в колодцах, парение и иные видимые изменения. Если трубопровод проходит над землей, а также в коллекторах, на насосных станциях, – выявить искажения в виде вспучиваний, коррозионных пятен, повреждений покрытий, трещин [14]. Затем проводятся расчеты с оценкой возможного срока эксплуатации трубопроводов, определения толщины стенок труб, электрометрических измерений. Задачей технического освидетельствования является оценка состояния трубопроводных магистралей, разработка рекомендаций по их ремонту и дальнейшей эксплуатации [15; 16].

Для более детальной диагностики трубопроводов используются следующие методы и средства.

Гидравлический метод, который заключается в том, что при прекращении подачи воды в сеть осуществляется ее визуальный осмотр. Если уровень воды в гидранте падает, имеют место утечки. Серьезным недостатком этих методов является частичное отключение участков сети [17].

Акустические методы позволяют установить не только факт утечки, но и место утечки. Акустический метод подразделяется на слуховой и корреляционный. Слуховой метод позволяет на поверхности земли определить место наибольшего количества колебаний, связанных с утечкой. Колебание грунта преобразуется в электрический ток, который фильтруется, усиливается и преобразуется в звуковые колебания, которые и слышит оператор через наушники. Недостатком этого метода является то, что необходимо точно знать место расположения трубопровода. Оператор должен быть очень внимательным и разделить полезный шум от посторонних, а сам прибор должен обладать максимальной чувствительностью к любым колебаниям почвы [15]. На рис. 12 приведен состав системы мониторинга. Этот метод лежит в основе комплекса СОК А-10, который используется для быстрого поиска скрытых утечек. Этот комплекс представляет собой пьезомикрофон, который расположен на конце локационного кабеля, выполненного из оптоволоконна и трубы-шлюза с резьбой. Принцип работы комплекса состоит в том, что локационный кабель проталкивают в трубу, которая находится под давлением, до тех пор, пока микрофон не дойдет до места утечки. Усиливается сигнал за счет течеискателя. Полученные данные передаются на поверхность земли оператору. Основным недостатком данного комплекта является то, что в диаметре трубы больше 300–400 мм кабель начинает закручиваться, что значительно осложняет проталкивание микрофона к месту утечки [15].

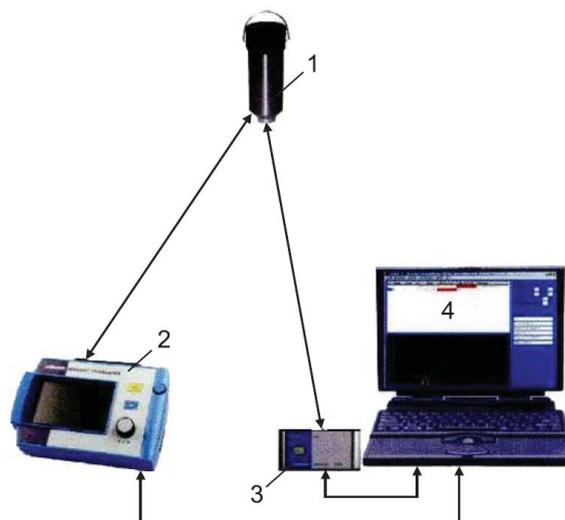


Рисунок 12 – Состав системы мониторинга: 1 – регистратор; 2 – блок управления; 3 – принимающее устройство; 4 – компьютер

При корреляционном методе на трубопровод устанавливают не менее двух датчиков, реагирующих на изменения вибрации. Повторяющиеся движения стенок трубы преобразуются в электрический ток. Затем производится фильтрация и усиление сигнала. Данный метод позволяет не только определить факт протечки, но и вычислить расстояние от датчика до места утечки. Однако данный метод требует проведения аварийных раскопок для установки датчиков и не может зафиксировать утечку на большой протяженности трубопровода из-за меньшего порога чувствительности, чем у акустических приборов. Кроме того, для применения этого метода нужно точно знать диаметр трубы, толщину стенок, материал, из которого изготовлены трубы. Да и отличить шум утечки от остальных шумов бывает очень сложно [17].

Акустико-эмиссионный метод осуществляет дистанционную диагностику при помощи пьезодатчиков, которые работают в режиме реального времени. Положительное свойство метода заключается в том, что он обеспечивает постоянный контроль состояния трубопроводов. Однако для того, чтобы применять подобный метод, необходим открытый доступ к трубопроводу, так как прослушивание возможно только при помощи микрофона, который должен быть приставлен к внешней стороне трубы. Для определения более точного места повреждения трубы необходимы минимум два датчика, которые должны быть расположены по обе стороны от источника звука. Таким образом, для реализации этого метода необходим доступ к трубе в нескольких местах, а это не всегда возможно и целесообразно. Ну и диагностирование иных коррозионных повреждений, помимо свищей и протечек, этот метод не позволяет.

Еще один вид диагностики – телеуправляемый диагностический комплекс, в основе которого лежит электромагнитно-акустический метод. Данный метод по сравнению с акустико-эмиссионным методом более предпочтителен, потому что позволяет обнаруживать дефекты без непосредственного контакта с рабочей поверхностью трубы и обследовать трубопровод глубиной залегания более двух метров. Несомненно, метод очень хорош, однако требует постоянного контроля со стороны оператора, который должен не только идти вдоль трубопроводной магистрали, но и быть в постоянном напряжении, что не исключает ошибок чисто человеческого фактора [18; 19].

Не менее интересен и сканер-дефектоскоп, который относится к оптико-электронным методам диагностики [20]. Этот метод применяют и для диагностики поверхности трубы, и при выполнении ремонтных работ на трубе. Сканер-дефектоскоп позволяет определить утечку не только через свищи, но и через микротрещины и выполняет диагностику состояния трубы со скоростью 100 п. м в час. При диагностике используется естественная намагниченность метал-

ла, сформировавшаяся в процессе эксплуатации. Однако этот метод не позволяет определять коррозионные повреждения на более ранних стадиях (питтинги, язвы, пятна и т. д.).

Известна технология на основе длинноволнового метода LRUT (LongRangeUltrasonicTechnology) с применением ультразвуковых волн [21]. Данный метод значительно выигрывает по сравнению с рассмотренными выше. Он позволяет не только отследить, но и оценить любые коррозионные повреждения без снятия изоляции. Однако отрицательной стороной этого метода является невозможность работы прибора без установки кольца с ультразвуковым преобразователем на поверхность трубы без изоляции, т. е. необходимы точная информация о месте залегания поврежденной трубы и аварийные раскопки. Система PS-2000, основанная на этом методе, приведена на рис. 13.



Рисунок 13 – Система PS-2000

Существует способ механических напряжений и реализующее его устройство с использованием тензодатчиков [22]. Принцип его работы состоит в измерении напряженно-деформированных изменений трубы.

Каждый из рассмотренных методов диагностики трубопровода имеет определенные преимущества, однако применение их не всегда целесообразно и возможно. Во-первых, при некоторых повреждениях необходимо присутствие оператора в месте прохождения трубопровода, что не исключает субъективной диагностики. Во-вторых, как правило, методы требуют аварийных раскопок. В-третьих, являются узконаправленными, не позволяют диагностировать все виды коррозионных повреждений в целом. Поэтому на сегодняшний день имеется потребность в создании метода и устройства, которые позволят прогнозировать текущее состояние и остаточный ресурс трубопровода, увеличить скорость обнаружения и анализа повреждений, минимизировать участие человека, проводить диагностику внутренней поверхности трубопровода по всей его длине без извлечения из грунта.

Заключение и выводы

В статье выполнена классификация коррозионных повреждений металлических поверхностей. Наибольшее распространение на внутренних поверхностях металлического трубопровода получили язвенная, точечная, межкристаллитная, растрескивающая, питтинговая, щелевая и сквозная коррозии.

Наличие и скорость коррозионных повреждений металла зависит от многих факторов: свойств металла, свойств транспортируемой жидкости, внешних воздействий. Учитывая, что трубопроводы выполняют транспортировку различных видов жидкостей, то и коррозионные повреждения внутренней поверхности трубопровода имеют различное происхождение и причины. В том числе наличие коррозии может быть связано с образованием сероводорода, который хорошо растворяется, например, в нефти, и, взаимодействуя с железом, образует

сульфид железа. Или, например, реакция ионов железа с водой и кислородом и, как следствие, образование коррозионного выпадения – ржавчины.

Используемые на практике гидравлические, акустические, корреляционные, акустико-эмиссионные методы обнаруживают все повреждения. Однако тот же акустико-эмиссионный метод, например, осуществляющий дистанционную диагностику при помощи пьезодатчиков и позволяющий определять наличие свищей или протечек, предполагает наличие открытого доступа к трубопроводу и не может зафиксировать иные коррозионные повреждения. Корреляционный метод, основанный на изменениях вибраций и позволяющий определять протечки и вычислять расстояние от датчика до места утечки, требует проведения аварийных раскопок для установки датчиков. Кроме того, все эти методы требуют непосредственного участия человека, необходимого для правильной оценки значимости полученных данных.

Существуют робототехнические комплексы, например, СОК А-10, используемые для быстрого поиска скрытых утечек, однако такой комплекс требует непосредственного участия человека, в связи с чем полученные данные могут быть не всегда корректны. Кроме того, этот комплекс не является автономным и зависит непосредственно от оператора, который вручную проталкивает кабель с датчиками по трубопроводу. Или, например, сканер-дефектоскоп, позволяющий определять утечки не только через свищи, но и через микротрещины. Однако он не способен определять коррозионные повреждения на более ранних стадиях образования свищей.

Устранить эти недостатки возможно лишь при создании модульного робототехнического комплекса, который обладает рядом следующих функций:

1. Обеспечивает контроль коррозионных повреждений без предварительного извлечения трубопровода из грунта и обладает способностью характеризовать состояние магистрали на всей ее протяженности.

2. Обладает возможностью сбора информации о состоянии трубы на участках различной сложности и реализует контроль внутренней поверхности трубопроводов в труднодоступных местах. Таким устройством может служить многозвенный робот, изображение которого приведено на рис. 14.

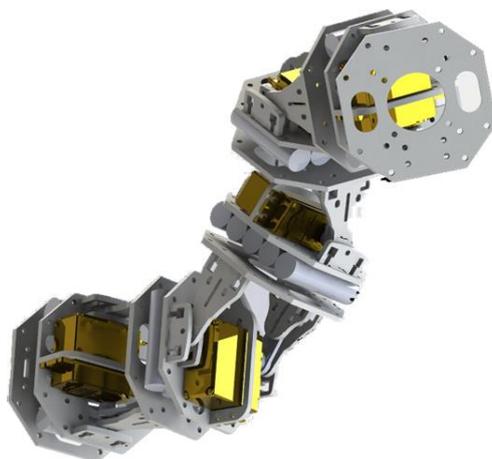


Рисунок 14 – Фрагмент многозвенного робота для доставки опτικο-электронной системы во внутреннюю полость трубы и анализа корродированной поверхности

3. Осуществляет автоматический анализ состояния трубопровода с минимальным участием человека за счет применения алгоритмов распознавания оптических изображений дефектов с использованием обучаемой нейронной сети и гистограммного метода анализа коррозии по изображениям.

4. Выполняет контроль поражения внутренней поверхности трубы различными видами и степенью коррозий на различных стадиях, определяет масштабы поражения с выделением координат дефекта и прогнозирует скорость эрозийно-коррозионных изменений.



Рисунок 15 – Оптико-электронная головка для многозвенного робота

Для реализации этого пункта на переднее звено многозвенного робота крепится оптико-электронная головка, показанная на рис. 15. Алгоритм распознавания коррозионного повреждения строится на анализе соотношений R,G-,B- компонент в цветном изображении фиксируемого участка трубы.

Литература

1. Коррозия металлов. Классификатор государственных стандартов : ГОСТ 5272-68 : Дата введения 01-01-69. – Текст : электронный // StandartGOST.ru. – URL: https://standartgost.ru/g/ГОСТ_5272-68 (Дата обращения: 07.07.2020).
2. Структура и коррозия металлов и сплавов : атлас / И. Я. Сокол [и др.]. – Москва : Металлургия, 1989. – 400 с. – Текст : непосредственный.
3. Тарасов, Ю. Л. Оценка сроков службы трубопроводов с учетом коррозионных повреждений / Ю. Л. Тарасов, О. В. Хвесьюк. – Текст : непосредственный // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12, № 1/2. – С. 536–541.
4. Бриков, А. В. Использование реагентов нефтепромысловой химии в условиях морских нефтегазодобывающих объектов / А. В. Бриков, А. Н. Маркин. – Текст : непосредственный // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2016. – № 7/8. – С. 52–56.
5. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Классификатор государственных стандартов : ГОСТ 18353-79 : Дата введения 01-07-80. – Текст : электронный // StandartGOST.ru. – URL: https://standartgost.ru/g/ГОСТ_18353-79 (Дата обращения: 12.05.2020).
6. Электрохимический метод снижения коррозионного износа внутренней поверхности промысловых трубопроводов / А. И. Подъяпольский, Ю. Г. Паламарчук, А. Р. Эпштейн, Д. С. Худяков. – Текст : непосредственный // Безопасность жизнедеятельности. – 2007. – № 6. – С. 13–18.
7. Борьба с коррозией трубопроводов при бактериальном заражении скважин нефтяных месторождений Западной Сибири / Н. В. Кутлунина, Э. П. Мингалев, Г. Д. Маланичев [и др.]. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 1986. – № 9. – С. 20–22.
8. Балабан-Ирменин, Ю. В. Защита от внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей : практическое пособие / Ю. В. Балабан-Ирменин, В. М. Липовских, А. М. Рубашов. – Москва : Новости теплоснабжения, 2008. – 288 с. – Текст : непосредственный.
9. Control of dispersed-phase temperature in plasma flows by the spectral-brightness pyrometry method / A. V. Dolmatov, I. P. Gulyaev, P. Yu. Gulyaev, V. I. Jordan // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 110, № 1. – P. 012058.
10. Медведева, М. Л. Коррозия и защита магистральных трубопроводов и резервуаров: Учебное пособие для вузов нефтегазового профиля / М. Л. Медведева, А. В. Мурадов, А. К. Прыгаев. – Москва : Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2013. – 250 с. – Текст : непосредственный.

11. Исследование возможностей длительной эксплуатации труб с незначительными стресс-коррозионными повреждениями / А. Б.Арабей, О. Н. Милехин, И. В. Ряховских [и др.]. – Текст : непосредственный // Вести газовой науки : научно-технический сборник. – 2016. – № 3/2. – С. 5–12.
12. Гумеров, А. Г. Капитальный ремонт и реконструкция магистральных нефтепроводов / А. Г. Гумеров, Р. С. Гумеров, Х. А. Азметов. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 2004. – № 11. – С. 7–12.
13. Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды : утверждены постановлением Федерального горного и промышленного надзора России от 11.06.2003, № 90 : регистрационный № 4719. – Текст : непосредственный // Российская газета. – 2003. – № 120/1.
14. Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса трубопроводов водопроводной и канализационной сетей г. Москвы / А. Б. Косыгин, И. В. Фомина, В. М. Горицкий, Д. П. Хромов. – Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 3. – С. 31–36.
15. Обнаружение скрытых утечек с использованием системы мониторинга водопроводной сети / А. Б. Косыгин, В. Н. Ханин, К. И. Государев, И. В. Фомина. – Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 4. – С. 22–26.
16. Черепанов, А. П. Оценка эффективности диагностирования сосудов, резервуаров и трубопроводов / А. П. Черепанов, Ю. В. Порошин. – Текст : непосредственный // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – №10. – С. 43–46.
17. Инструментальный контроль за строительством водопроводных и канализационных сетей Москвы / А. Б. Косыгин, В. Н. Ханин, И. В. Фомина [и др.]. – Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. – № 10. – С. 42–48.
18. Современные методы контроля и диагностирования технологических трубопроводов / Т. А.Миронова, С. В.Хмелев, А. П. Миронов, А. И.Садилов. – Текст : непосредственный // Евразийский Научный Журнал. – 2015. – № 9. – С. 2–15.
19. Опыт проведения внутритрубной диагностики трубопроводов с выявлением дефектов КРН и коррозии / М. Е. Федосовский, М. В. Соколов, А. В. Сорокин, В. А. Аржанов. – Текст : непосредственный // В мире неразрушающего контроля. – 2009. – № 4-46. – С. 18–22.
20. Способ измерения яркостной температуры объекта : Патент 2099674 РФ, МПК G01J 5/52 : Заявл. 01.07.1996 : Оpubл. 20.12.1997 / В. В. Евстигнеев, В. М. Коротких, П. Ю. Гуляев [и др.]. – 6 с. – Текст : непосредственный.
21. Внедрение новой концепции диагностики технологических трубопроводов в ОАО «Самотлорнефтегаз» / М. Ф. Галиуллин, С. Д. Шевченко, С. Н. Вагайцев [и др.]. – Текст : непосредственный // В мире неразрушающего контроля. – 2012. – № 3-57. – С. 61–64.
22. Неразрушающий контроль в строительстве : учебное пособие / И. Эйнав [и др.] ; под общей редакцией В. В. Клюева. – Москва : Спектр, 2012. – 311 с. – ISBN 978-5-4442-0016-2. – Текст : непосредственный.
23. Thermal analysis of reaction producing K_xTiO_2 / K. Borodina [et al.]. – DOI: 10.1007/s10973-017-6840-0 // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2018. – Vol. 131, № 1. – P. 561–566.