

УДК 681.5

DOI 10.17513/snt.39884

СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ КОРРОЗИИ ПРОМЫСЛОВОГО НЕФТЕПРОВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ И CBR-ПОДХОДА

Кузяков О.Н., Сидорова А.Э., Лапик Н.В., Попова Н.В.

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, e-mail: sidorovaae@tyuiu.ru

В статье рассматривается вопрос создания системы непрерывного определения состояния промышленного нефтепровода на предмет коррозии с использованием предиктивной аналитики и CBR-подхода. Представлены основные факторы, оказывающие влияние на скорость коррозии, а также основные параметры, определяющие скорость коррозии, степень их влияния на этот процесс для их учета. Предложен принцип построения системы определения скорости коррозии, особенностью которой является механизм вычисления прогнозируемой скорости коррозии на основе прецедентного подхода с использованием предиктивной аналитики с применением CBR-метода с выдачей рекомендаций по профилактическим действиям, направленным на предотвращение нестандартных ситуаций, таких как прорыв трубопровода и т.п. Рассмотрена структура кейса и описаны используемые лингвистические переменные, в результате определяется расстояние между ближайшими состояниями объекта по степени близости. Таким образом, разработанная схема предиктивной аналитики с использованием CBR-метода позволяет решить задачу выбора правильного решения при осуществлении анализа пространства состояний Sit_i ($i=1...k$) для промышленного трубопровода. Для распознавания состояний Sit_i могут быть также применены методы с использованием нейронных сетей и методов машинного обучения.

Ключевые слова: система определения скорости коррозии, режимы течения газожидкостной смеси, процесс коррозии, предиктивная аналитика, теория прецедентов

SYSTEM FOR DETERMINING THE CORROSION RATE OF A FIELD OIL PIPELINE USING PREDICTIVE ANALYTICS AND CBR APPROACH

Kuzyakov O.N., Sidorova A.E., Lapik N.V., Popova N.V.

Industrial University of Tyumen, Tyumen, e-mail: sidorovaae@tyuiu.ru

The article discusses the issue of creating a system for continuously determining the condition of a field oil pipeline for corrosion using predictive analytics and the CBR approach. The main factors affecting the rate of corrosion, as well as the main parameters determining the rate of corrosion, as well as the degree of their influence on this process for their accounting are presented. The principle of constructing a system for determining the rate of corrosion is proposed, the feature of which is a mechanism for calculating the predicted rate of corrosion based on an individual approach using predictive analytics using the CBR method with recommendations for preventive actions aimed at preventing abnormal situations, such as a pipeline break, etc. The structure of the case is considered and the linguistic variables used are described, and as a result, according to the degree of proximity the distance between the nearest states of the object is determined. Thus, the developed predictive analytics scheme the developed predictive analytics scheme using the CBR method allows us to solve the problem of choosing the right solution when analyzing the Sit_i ($i=1...k$) state space for a field pipeline. Methods using neural networks and machine learning methods can also be used to recognize Sit_i states.

Keywords: corrosion rate determination system, gas-liquid mixture flow modes, corrosion process, predictive analytics, precedent theory

В настоящее время в системах сбора и транспортировки нефти остро стоит задача безаварийной работы. Повышение надежности работы промышленных нефтепроводов улучшит экологическую обстановку в регионах добычи нефти и существенно снизит затраты на обслуживание этих систем сбора и транспортировки. Данное исследование направлено на разработку способов предотвращения аварийных ситуаций, связанных с внутренней коррозией нефтепроводов.

Известно, что нефть и нефтяной попутный газ сами по себе не вызывают значимой коррозии. Практически всегда внутренняя

коррозия появляется по причине протекания электрохимических процессов, возникающих из-за контакта пластовой воды и металла нефтепровода. Создание системы направлено на определение скорости коррозии с выдачей рекомендаций по профилактическим действиям.

Таким образом, целью исследования является повышение эффективности процесса принятия решений по предотвращению прорывов промышленных нефтепроводов вследствие процесса их коррозии с использованием предиктивной аналитики с применением механизма CBR-подхода с использованием теории прецедентов.

Материалы и методы исследования*Причины внутренней коррозии*

На сегодняшний день известны системы для мониторинга коррозии промышленных нефтепроводов [1, 2].

Входными данными для этих систем являются параметры и характеристики, влияющие на вид коррозии и ее скорость формирования [3]. Известно [4-6], что на скорость коррозии оказывают влияние следующие факторы:

- 1) состав и свойства газожидкостной смеси;
- 2) режим движения (течения) газожидкостной смеси;

3) состав и свойства извлекаемой с нефтью пластовой воды;

4) состав и свойства попутного нефтяного газа;

5) соотношение воды в газожидкостной смеси и характер распределения этих фаз друг в друге;

6) образование защитных пленок;

7) наличие абразивных частиц в потоке газожидкостной смеси;

8) проявление жизнедеятельности бактерий.

Основные параметры, определяющие скорость коррозии, а также степень их влияния на этот процесс для их учета в исследуемой системе, приведены в таблице.

Основные параметры, определяющие скорость коррозии

Параметры, влияющие на скорость коррозии	Степень влияния
1. Состав газожидкостной гетерогенной смеси по содержанию коррозионно-активных компонентов	
Сероводород CH_4	Высокая
Двуокись углерода CO_2	Высокая
Сульфиды железа FeS , FeS_2	Высокая
Кислород O_2	Высокая
Органические и прочие кислоты	Высокая
Йод	Средняя
Сульфатовосстанавливающие бактерии	Высокая
Соли, растворенные в воде и являющиеся электролитами	Высокая
2. Диаметр трубопровода	
До 820 мм	Высокая
3. Температурный режим и вследствие этого вид коррозии	
Химическая коррозия (высокотемпературная)	Средняя
Электрохимическая (низкотемпературная)	Высокая
4. Структура течения потоков в трубопроводе	
Расслоенная	Низкая
Волновая	Низкая
Кольцевая	Средняя, равномерная
Дисперсная	Высокая
Дисперсно-кольцевая	Низкая
Пробковая	Средняя
Снарядная	Высокая
5. Скорость течения газожидкостной смеси	
Высокая	Низкая
Низкая	Высокая
6. Обводненность нефти	
Низкая	Низкая
Высокая	Высокая
7. Давление в трубопроводе	
	Высокая
8. Плотность воды в составе газожидкостной смеси	
	Низкая
9. Плотность нефти в составе газожидкостной смеси	
	Высокая



Функциональная схема предиктивной аналитики с использованием CBR-технологии

Прецедентный подход с использованием предиктивной аналитики с применением CBR-метода [7, 8, 9] заключается в том, что для принятия верного решения при прогнозировании степени коррозии на каком-либо участке промышленного нефтепровода степень коррозии не определяется с нуля – ее оценка производится с использованием решения из прошлого опыта, накапливаемого в виде схожих ситуаций (кейсов) и следующих из этих ситуаций решений по принятию мер предотвращения прорывов и прочих нештатных ситуаций. Эти кейсы в CBR-системах, называемые пары «ситуация – решение», сохраняются в специальных библиотеках кейсов – СВ.

Схема предиктивной аналитики с использованием CBR-технологии

Предиктивная (прогнозная, предсказательная) аналитика является последующей частью общей аналитики для технологического процесса, включающей описательную и диагностическую аналитику. Описательная отвечает на вопрос: «Что случилось?», создает сводку исторических данных для их дальнейшего анализа и реализуется посредством сбора данных с датчиков и идентификации момента сбоя. Диагностическая аналитика анализирует информацию, чтобы ответить на вопрос: «Почему это случилось?» Предиктивная же аналитика прогнозирует неизвестные события в будущем, отвечая на вопрос: «Что может слу-

читься?» на основе анализа накопленной информации. Здесь используется множество методов: математическая статистика, моделирование, машинное обучение и другие области Data Science, а также интеллектуальный анализ данных (Data Mining). К примеру, предиктивная аналитика текущих и прошлых показателей работы промышленного оборудования заблаговременно определит возможное время его профилактического ремонта, чтобы избежать его выхода из строя [10].

Предлагается использовать функциональную схему работы такого комплекса, которая показана на рисунке.

Кейсы, входящих в базу кейсов СВ, получают следующим образом:

- 1) на основе лабораторных (экспериментальных) исследований с применением математических моделей;
- 2) при натурных исследованиях на контролируемом объекте [11].

Результаты исследования и их обсуждение

Структура кейса имеет следующий вид:

$$CB = \{ \langle Sit, R, M \rangle / k = 1, \dots, n \}, \quad (1)$$

где n – число случаев в СВ, Sit – ситуация (структурированное описание некоторого состояния в исследуемой системе), которая представляет собой набор параметров $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i\}$, отвечающих за особенности состояния объекта, идентификаторы

и координаты датчиков и пр.; R – решение, которое можно представить в виде совокупности: R1 – описание текущей ситуации, включающее особенности состояния объекта, которые соответствуют конкретной ситуации Sit, R2 – идентификатор типа ситуации: обычная, аварийная, потенциально аварийная, R3 – рекомендации для обслуживающего персонала о действиях в определенной ситуации (инструкции, технологические схемы, руководства); M – это ссылки на возможные случаи в СВ, связанные с текущим случаем [10, 12].

Поэтому на базе полученных ранее параметров и созданной базы кейсов СВ система определяет, есть ли близкий к только что полученным параметрам кейс. При этом расстояние между ближайшими состояниями объекта определяется как:

$$D_i = S_{i_{\text{мек}}} - S_{ik}, \quad (2)$$

где $S_{i_{\text{мек}}}$ – текущее состояние объекта;

S_{ik} – состояние объекта из сформированного пространства состояний.

Из допустимого множества прецедентов SC (Set of Cases), которые имеют степень сходства (близости), большую или равную пороговому значению $h_{\text{пор}}$, выявляется искомый прецедент. Его степень близости к текущему может быть определена исходя из одного из существующих классических критериев [7]: *метод ближайшего соседа* (NN – Nearest Neighbor) – наиболее используемый метод сравнения и извлечения прецедентов, *метод извлечения прецедентов на основе деревьев решений* (базируется на нахождении требуемых прецедентов путем разрешения вершин дерева решений, причем каждая вершина дерева указывает, по какой ее ветви следует осуществлять дальнейший поиск решения, а выбор ветви производится на основе информации о текущей проблемной ситуации), *метод извлечения прецедентов на основе знаний* (когда учитываются данные экспертов), *метод извлечения прецедентов с учетом их применимости* и некоторые другие.

Если близкий результат есть в базе кейсов, то система сразу же выдает результат в виде прогноза скорости коррозии и рекомендаций по профилактическим действиям, так как каждому набору параметров соответствует определенный кейс. Кроме того, в базе кейсов имеются справочные параметры – известные константы и поправочные коэффициенты.

Если такого близкого кейса нет, то вновь полученные параметры направляются в вычислитель, где производятся вычисления критериев Фруда, Вебера и Кутателадзе [6], и по этим критериям определяются тип во-

дяной эмульсии, характер (локализация) коррозии и скорость коррозии:

$$V_{\text{кор}} = 31,15 \times C_{\text{нф}} \times C_n \times (\Delta P/L) \times 0,3 \times v \times 0,6 \times P_{\text{CO}_2} \times 0,8 \times T \times (e^{-2671/T}), \quad (3)$$

где $(\Delta P/L)$ – перепад давления поперек зоны смешения водяной пробки, н/м³;

v – содержание воды, м³;

P_{CO_2} – парциальное давление углекислого газа, МПа;

T – температура в многофазной среде, К;

$V_{\text{кор}}$ – скорость коррозии, мм/год.

Данная формула была дополнена некоторыми коэффициентами, учитывающими особенности протекающих гидродинамических и физико-химических процессов, сопровождающих процесс перекачки нефти по трубопроводу:

$$C_{\text{нф}} = 0,023 \times F_{\text{вн}} + 0,214, \quad (4)$$

где $C_{\text{нф}}$ – нормирующий фактор, изменяющийся в пределах от 0 до 1;

$F_{\text{вн}}$ – частота водяной пробки, она обычно не более 35 пузырек/минута. В горизонтальных трубопроводах это значение может находиться в пределах от 1 до 10; если наклон трубопровода составляет более 0,5 градуса, то $F_{\text{вн}}$ может быть существенно увеличена, вплоть до значения 60.

Влияние типа нефти на скорость коррозии может быть учтено следующим коэффициентом:

$$C_n = 10 \times \frac{\lg(K\text{Ч} \times \% \text{CO}_2) + 0,38}{2400}, \quad (5)$$

где $K\text{Ч}$ – кислотное число.

При этом C_n находится в пределах от 0 до 1, а для учета влияния концентраций HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} и pH в формулу введены поправочные коэффициенты K_{HCO_3} , K_{Cl} , K_{Ca} , K_{pH} .

Тогда итоговое уравнение для вычисления скорости коррозии имеет вид:

$$V_{\text{кор}} = 31,15 \times C_{\text{нф}} \times C_n \times (\Delta P/L) \times 0,3 \times v \times 0,6 \times P_{\text{CO}_2} \times 0,8 \times T \times (e^{-2671/T}) \times K_{\text{HCO}_3} \times K_{\text{Cl}} \times K_{\text{Ca}} \times K_{\text{pH}}, \quad (6)$$

После расчета $V_{\text{кор}}$ производятся создание нового кейса с применением анализа экспертных оценок и вычисление более точного результата не только по скорости коррозии, также осуществляется выдача рекомендаций по профилактическим действиям, направленным на предотвращение нештатных ситуаций, таких как прорыв трубопровода или возникновение трещин и свищей [13-15]. Вновь созданный кейс сохраняется в базе кейсов, пополняя ее все новыми сценариями с комплексом соответствующих атрибутов.

Заключение

Таким образом, использование предиктивной аналитики на основе CBR-метода позволяет проводить мониторинг коррозионных процессов для промышленных нефтепроводов и осуществлять поддержку принятия верного решения по текущей ситуации с выдачей прогноза на рассматриваемый временной период.

Разработанная схема предиктивной аналитики с использованием CBR-метода дает возможность решить задачу выбора правильного решения при осуществлении анализа пространства состояний Sit_i ($i=1 \dots k$) для промышленного трубопровода. Для распознавания состояний Sit_i могут быть также применены методы с использованием нейронных сетей и методов машинного обучения.

Список литературы

1. Кузяков О.Н., Сидорова А.Э. Способ определения режима многофазной смеси в трубопроводе с использованием CBR-технологий // Патент 2660411 Рос. Федерация, МПК G01N 29/024 / патентообладатель ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный ун-т». № 2016146871; заявл. 29.11.2016; опубл. 06.07.2018, Бюл. № 19.
2. Кузяков О.Н., Сидорова А.Э. Система мониторинга режима многофазной смеси в трубопроводе с использованием CBR-технологий // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 5-3. С. 459–462.
3. Кузяков О.Н., Глухих И.Н., Сидорова А.Э., Андреева М.А. Прецедентный подход в интеллектуальных системах мониторинга многофазной смеси в нефтепроводе // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2017. № 8. С. 4-8.
4. Марон В.И. Гидравлика двухфазных потоков в трубопроводах: учебное пособие. СПб.: Лань, 2012. 256 с.
5. Бугай Д.Е., Гетманский М.Д., Фаритов А.Т., Рябухина В.Н. Прогнозирование коррозионного разрушения нефтепромысловых нефтепроводов: обзор. информ. Серия: «Борьба с коррозией и защита окружающей среды». М.: ВНИИОЭНГ, 1989. 64 с.
6. Мамаев В.А., Одишария Г.Э., Семенов Н.И., Точигин А.А. Гидродинамика газожидкостных смесей в трубах. М.: Недра, 1969. 208 с.
7. Варшавский П.Р., Еремеев А.П. Моделирование рассуждений на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. № 2. С. 45-57.
8. Башлыков А.А. Применение методов теории прецедентов в системах поддержки принятия решений при управлении трубопроводными системами // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2016. № 1. С. 23-32.
9. Галлямов И.И., Шагалева Е.Г. Способ обнаружения сквозных дефектов в противокоррозионном покрытии подземных трубопроводов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2021. № 10. С. 42-45.
10. Кузяков О.Н., Андреева М.А. Способ обнаружения сквозных дефектов в противокоррозионном покрытии подземных трубопроводов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2020. № 12. С. 33-37.
11. Варшавский П.Р., Еремеев А.П. Моделирование рассуждений на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. № 2. С. 45-57.
12. Ермолкин О.В., Попова Я.Д., Гавшин М.А., Великанов Д.Н. Способ обнаружения сквозных дефектов в противокоррозионном покрытии подземных трубопроводов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2019. № 7. С. 30-35.
13. Артеменков В.Ю., Корякин А.Ю., Шустов И.Н., Дикамов Д.В., Шишков Э.О., Юсупов А.Д. Организация коррозионного мониторинга на объектах второго участка ачимовских отложений Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения // Газовая промышленность. 2017. № 2. С. 74-78.
14. Баджаков Д.В., Головин Е.Д., Козлов М.Г., Курмангалиев Р.З., Лыхин П.А., Ульянов В.Н., Усов Э.В. Реализация методики расчета PVT-свойств многофазного многокомпонентного флюида // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2021. № 2. С. 24-31.
15. Петров В.Н., Ахметзянова Л.А. Влияние гидродинамического удара и кавитации на характеристики нефтяного потока // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2019. № 4. С. 46-50.