

А.Л. Колосова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ КОРРОЗИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОПРОВОДЕ

Предлагается нечеткая модель оценки потенциально прогнозируемой скорости коррозии магистральных газопроводов на основе системы нечеткого вывода. В модели учитываются переменные факторы, влияющие на скорость роста коррозионных дефектов. Создана соответствующая база знаний: терм-множества нечетких исходных переменных и правила вывода. В качестве машины нечеткого вывода используется метод Мамдани с последующей дефаззификацией для получения конкретных оценок.

Газопровод, коррозия, модель, надежность, нечеткие множества.

Основными причинами аварий газопроводов являются коррозионное разрушение и коррозионное растрескивание под напряжением (КНР или стресс-коррозия) [1]. Известно, что каждый третий отказ на магистральных газопроводах происходит из-за коррозии. Более 70 % дефектов, выявленных внутритрубной дефектоскопией, имеет коррозионное происхождение. По мнению ряда авторов [2], эксплуатационная надежность магистральных газопроводов определяется в основном коррозионными процессами.

Протяженность трубопроводов, используемых для транспортных целей, непрерывно возрастает, что связано с бесспорным их преимуществом перед всеми существующими способами транспортировки нефтепродуктов. В то же время увеличение протяженности трубопроводов приводит к повышению возможности их разрушения в результате коррозии [3]. Именно поэтому чрезвычайную важность приобретает задача оценки несущей способности и остаточного ресурса магистральных газопроводов с дефектами, решение которой позволило бы по априорным данным определять полную картину коррозионных разрушений газопровода и прогнозировать развитие ситуации.

В литературе [1] предложена математическая модель, функционально описывающая участки магистрального газопровода по степени их коррозионной опасности и включающая в себя расчет величины потенциально прогнозируемой скорости коррозии (ППСК), на основании которых формируются необходимые рекомендации по обеспечению прочностной надежности и безопасности эксплуатируемого магистрального газопровода.

Глубина коррозионного повреждения P определяется суммой переменных, не зависящих друг от друга и описывающих различные параметры среды околотрубного пространства X :

$$P = f\left(\sum X_i\right),$$

где X_i — i -я переменная, описывающая каждый из влияющих параметров среды, или:

$$X_i = k_i \cdot \tau,$$

где k_i — коэффициент качественной оценки каждого i -го параметра; τ — время, годы.

Скорость коррозии или скорость роста глубины коррозионного повреждения является производной от этой величины:

$$V_{\text{корр}} = \frac{dP}{d\tau} = \sum k_i .$$

Это означает, что при помощи коэффициентов k_i можно с достаточной точностью описать коррозионный процесс в интересующий момент времени.

Потенциально прогнозируемая скорость коррозии — это такая скорость коррозии металла $V_{\text{пп}}$, которая характеризует рост глубины дефекта наружной стенки газопровода в заданный момент времени и в зависимости от активности коррозионных факторов k_i , допуская развитие этого дефекта в любой точке обследуемого участка. В общем виде величина потенциально прогнозируемой скорости коррозии $V_{\text{пп}}$ определяется из выражения

$$V_{\text{пп}} = \sum_1^i \frac{k_i}{n} ,$$

где n — число коэффициентов k_i , принятых для расчета потенциально прогнозируемой скорости коррозии.

В качестве переменных факторов k_i , влияющих на скорость роста коррозионных дефектов, в модели, представленной в [1], за основу приняты следующие:

1. Литологический состав грунта. При этом косвенно учитываются такие факторы, как дисперсность, механический состав, пористость, степень анаэробности.

2. Удельное электрическое сопротивление грунта ρ (Ом·м), учитывающее при соответствующем разnose электродов неоднородность грунта по глубине залегания газопровода и косвенно характеризующее наличие грунтовых вод в зоне подземного сооружения.

3. Марка стали труб подземного газопровода, характеризующая качество металла.

4. Ионная сила грунтовой влаги, выражающая степень коррозионной активности ее солевого состава.

5. Окислительно-восстановительный потенциал грунта (редокс-потенциал), характеризующий скорость коррозионного разрушения сталей под воздействием микробиологической деятельности анаэробных бактерий.

6. Уровень электрозащитности газопровода, учитывающий силу депассивации поверхности труб, вызывающей развитие коррозии.

7. Кислотность грунтового электролита, учитывающая активность катодных реакций растворения поверхности стали в результате восстановления ионов окислителей (ионы водорода и растворенного кислорода) в кислой среде.

Для более полной и точной оценки скорости роста коррозионных дефектов предлагается дополнить данный список такими факторами, как концентрация напряжений в газопровode и срок его эксплуатации. Напряженно-деформированное состояние газопровода является одним из важнейших внутренних факторов развития коррозии, обуславливающих возможность ее возникновения и развития [1]. Срок эксплуатации газопровода также серьезно влияет на механизм развития коррозионных дефектов в связи с изменениями (коррозионными, механическими и др.), происходящими в металле труб с течением времени. Так, установлено, что в анаэробных грунтах образцы метал-

ла сначала корродируют интенсивно, но со временем процесс тормозится, а в слабо анаэробных средах скорость этого процесса остается неизменной [1].

Каждый переменный фактор k_i можно численно оценить для учета его влияния на потенциально прогнозируемую скорость коррозии. Понятно, что численная величина будет лишь с некоторой долей вероятности отражать реальный вес любого из факторов. В этом случае было бы целесообразно воспользоваться такими методами оценки, которые специально ориентированы на построение моделей, учитывающих неполноту и неточность исходных данных. Именно в таких ситуациях технология нечеткого моделирования является наиболее конструктивной, поскольку прежде всего ориентирована на современную тенденцию увеличения сложности математических и формальных моделей реальных систем и процессов управления, связанную с желанием повысить их адекватность и учесть все большее число различных факторов, оказывающих влияние на процессы принятия решений [4].

В связи с этим предлагается для оценки влияния всех указанных факторов на потенциально прогнозируемую скорость коррозии создать нечеткую модель на основе системы нечеткого вывода.

В качестве входных переменных будем использовать оценки факторов:

- 1) срок эксплуатации газопровода;
- 2) уровень напряжений в стенках газопровода;
- 3) степень анаэробности грунта;
- 4) удельное электрическое сопротивление грунта;
- 5) качество марки стали;
- 6) ионная сила грунтовой влаги;
- 7) окислительно-восстановительный потенциал грунта (редокс-потенциал);
- 8) средняя плотность катодного тока;
- 9) уровень pH грунта.

В качестве выходной переменной используется оценка потенциально прогнозируемой скорости коррозии.

Основными этапами нечеткого вывода являются:

- формирование базы правил систем нечеткого вывода;
- фаззификация входных переменных;
- агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций;
- активация подзаключений в нечетких правилах продукций;
- аккумуляирование заключений нечетких правил продукций;
- дефаззификация выходных переменных.

Для оценки скорости коррозии используются следующие эвристические правила:

1. Если срок эксплуатации газопровода небольшой и грунт анаэробный, то скорость коррозии повышенная.
2. Если срок эксплуатации газопровода длительный и грунт аэробный, то скорость коррозии умеренная.
3. Если грунт аэробный, то скорость коррозии умеренная.
4. Если уровень напряжений в стенках газопровода низкий, то скорость коррозии низкая.
5. Если уровень напряжений в стенках газопровода средний, то скорость коррозии умеренная.
6. Если уровень напряжений в стенках газопровода повышенный, то скорость коррозии средняя.
7. Если уровень напряжений в стенках газопровода высокий, то скорость коррозии повышенная.

8. Если удельное сопротивление грунта низкое, то скорость коррозии средняя.

9. Если удельное сопротивление грунта среднее, то скорость коррозии умеренная.

10. Если удельное сопротивление грунта высокое, то скорость коррозии низкая.

11. Если используется высококачественная марка стали, то скорость коррозии низкая.

12. Если используется качественная марка стали, то скорость коррозии умеренная.

13. Если используется некачественная марка стали, то скорость коррозии средняя.

14. Если ионная сила грунтовой влаги высокая, то скорость коррозии высокая.

15. Если ионная сила грунтовой влаги средняя, то скорость коррозии средняя.

16. Если ионная сила грунтовой влаги низкая, то скорость коррозии низкая.

17. Если редокс-потенциал грунта высокий, то скорость коррозии низкая.

18. Если редокс-потенциал грунта средний, то скорость коррозии средняя.

19. Если редокс-потенциал грунта низкий, то скорость коррозии повышенная.

20. Если редокс-потенциал грунта крайне низкий, то скорость коррозии высокая.

21. Если средняя плотность катодного тока низкая и удельное электрическое сопротивление грунта среднее, то скорость коррозии низкая.

22. Если средняя плотность катодного тока средняя и удельное электрическое сопротивление грунта низкое, то скорость коррозии средняя.

23. Если средняя плотность катодного тока высокая и удельное электрическое сопротивление грунта низкое, то скорость коррозии низкая.

24. Если уровень pH грунта кислый, то скорость коррозии высокая.

25. Если уровень pH грунта слабокислый, то скорость коррозии средняя.

26. Если уровень pH грунта нейтральный, то скорость коррозии низкая.

27. Если уровень pH грунта слабощелочной, то скорость коррозии средняя.

28. Если уровень pH грунта щелочной, то скорость коррозии высокая.

При построении нечеткой модели оценки потенциально прогнозируемой скорости коррозии магистральных газопроводов все рассматриваемые переменные измеряются в принятых диапазонах значений [1, 5, 6].

В качестве терм-множества первой входной переменной «Срок эксплуатации газопровода» будем использовать множество $T_1 = \{\text{«небольшой»}; \text{«длительный»}\}$ с функциями принадлежности термов (рис. 1).

Терм-множества входных переменных со второй по девятую с функциями принадлежности термов изображены на рис. 2–9 соответственно.

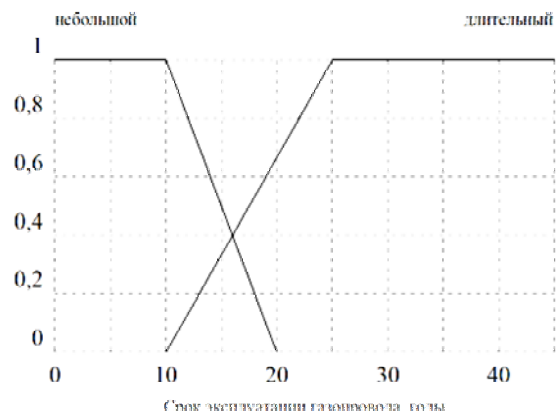


Рис. 1. График функции принадлежности для термина лингвистической переменной «Срок эксплуатации газопровода»

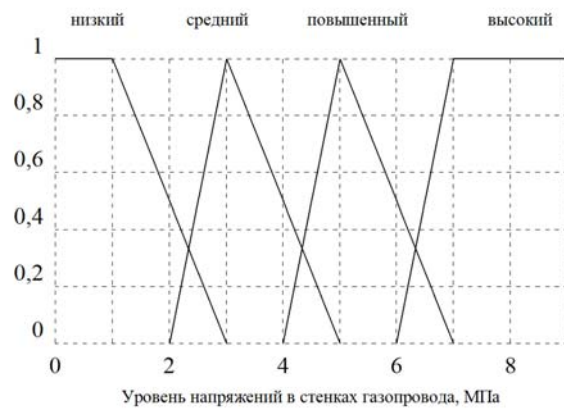


Рис. 2. График функции принадлежности для термина лингвистической переменной «Уровень напряжений в стенках газопровода»

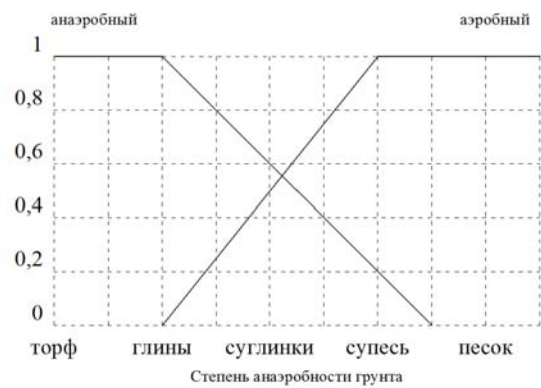


Рис. 3. График функции принадлежности для термина лингвистической переменной «Степень анаэробности грунта»

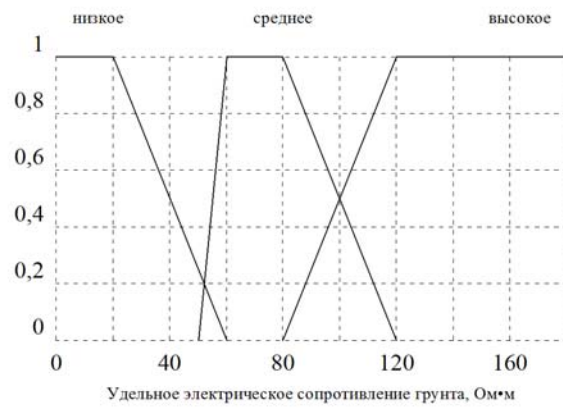


Рис. 4. График функции принадлежности для термина лингвистической переменной «Удельное электрическое сопротивление грунта»

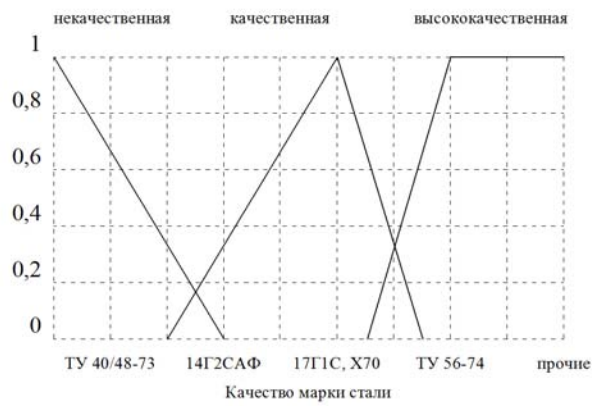


Рис. 5. График функции принадлежности для термина лингвистической переменной «Качество марки стали»

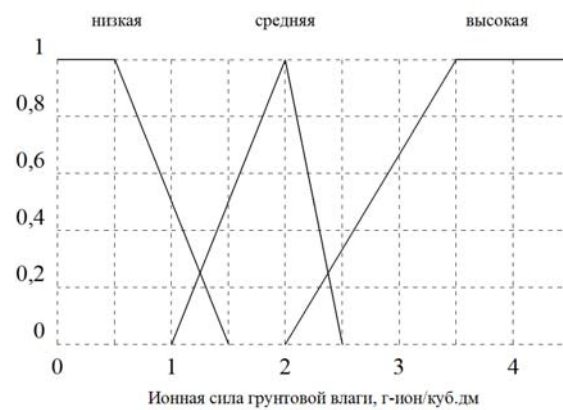


Рис. 6. График функции принадлежности для термина лингвистической переменной «Ионная сила грунтовой влаги»

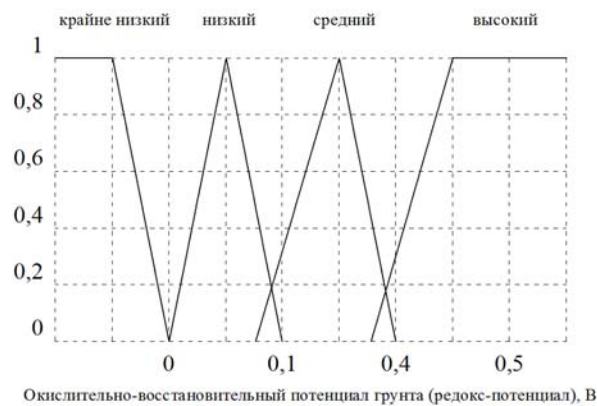


Рис. 7. График функции принадлежности для термина лингвистической переменной «Окислительно-восстановительный потенциал грунта (редокс-потенциал)»

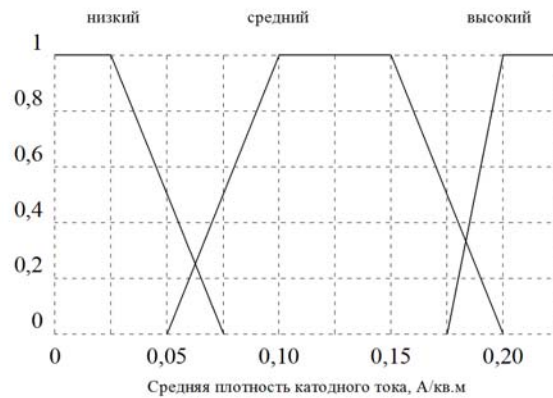


Рис. 8. График функции принадлежности для термина лингвистической переменной «Средняя плотность катодного тока»

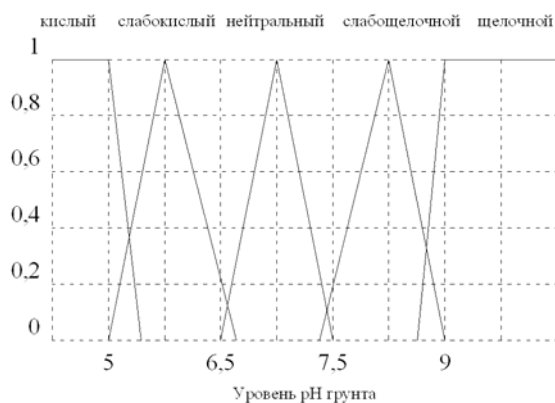


Рис. 9. График функции принадлежности для термина лингвистической переменной «Уровень pH грунта»

В качестве терм-множества выходной переменной «Потенциально прогнозируемая скорость коррозии» будем использовать множество $T_{10} = \{\text{«низкая»}; \text{«умеренная»}; \text{«средняя»}; \text{«повышенная»}; \text{«высокая»}\}$ с функциями принадлежности термов (рис. 10).

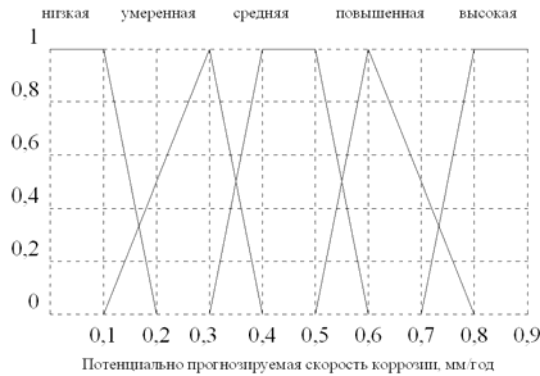


Рис. 10. График функции принадлежности для терма лингвистической переменной «Потенциально прогнозируемая скорость коррозии»

В качестве схемы нечеткого вывода будем использовать метод Мамдани, поэтому методом активации будет MIN, который рассчитывается по формуле

$$\mu'(y) = \min\{c_i, \mu(y)\},$$

где $\mu(y)$ — функция принадлежности терма, который является значением некоторой выходной переменной ω ; c_i — значение степени истинности подзаключений для каждого i -го правила, входящего в рассматриваемую базу правил системы нечеткого вывода.

Далее необходимо определить методы агрегирования подусловий. Поскольку во всех правилах 1–28 в качестве логической связки для подусловий применяется только нечеткая конъюнкция (операция «И»), то в качестве метода агрегирования будем использовать операцию min-конъюнкции.

Для аккумуляции заключений правил будем использовать метод максидизъюнкции, который также применяется в случае схемы нечеткого вывода методом Мамдани. Наконец, в качестве метода дефаззификации будем использовать метод центра тяжести:

$$y = \frac{\int_{\text{Min}}^{\text{Max}} x \cdot \mu(x) \cdot dx}{\int_{\text{Min}}^{\text{Max}} \mu(x) \cdot dx},$$

где y — результат дефаззификации; x — переменная, соответствующая выходной лингвистической переменной ω ; $\mu(x)$ — функция принадлежности нечеткого множества, соответствующего выходной переменной ω после этапа аккумуляции; Min и Max — левая и правая точки интервала носителя нечеткого множества рассматриваемой выходной переменной ω .

Предложенная модель на основе системы нечеткого вывода позволяет дать комплексную оценку влияния внутренних и внешних факторов коррозии на магистральный газопровод.

Рассмотренные методы входят в систему мониторинга магистральных газопроводов, разработка которой находится на стадии создания специализированных программных сред для реализации комплексных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Теплинский Ю.А., Быков И.Ю.* Управление эксплуатационной надежностью магистральных газопроводов. М.: Нефть и газ. 2007. 400 с.
2. *Петров Н.А., Фатрахманов Ф.Х., Петрунин М.А. и др.* Перспективные задачи полевой диагностики, коррозионного прогноза и мониторинга магистральных газопроводов // Надежность и ресурс газопроводных конструкций. М.: ВНИИГАЗ. 2003. С. 231–235.
3. *Андреев И.Н.* Введение в коррозиологию: Учеб. пособие. Казань: Изд-во Казан. гос. технологического ун-та. 2004. 140 с.
4. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург. 2003. 236 с.
5. *СП 42-101-96.* Проектирование и строительство газопроводов из полиэтиленовых труб диаметром до 300 мм. М.: ВНИИСТ, 1996. 98 с.
6. *ГОСТ 9.602-2005.* ЕСЗКС. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Стандартинформ, 2006. 73 с.

A.L. Kolosova

USING METHODS OF indistinct MODELING FOR INTEGRATED EVALUATION REGARDING SPEED OF CORROSION PROCESSES IN GAS LINE

The author suggests indistinct model to evaluate potentially forecasted corrosion speed in gas mains basing on a system of indistinct deduction. The model accounts for variable factors influencing speed of increasing corrosion defects. Subject to development being a corresponding data-base: term-sets of indistinct initial variables and deduction rules. As a tool of indistinct deduction it was Mamdanian method used, with a following dephasing to obtain specific evaluations.

Gas line, corrosion, model, reliability, indistinct sets.