

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian journal of transport engineering <http://t-s.today/>

2014, Том 1, №3 / 2014, Vol 1, No 3 <http://t-s.today/issues/vol1-no3.html>

URL статьи: <http://t-s.today/PDF/02TS314.pdf>

DOI: 10.15862/02TS314 (<http://dx.doi.org/10.15862/02TS314>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Жданова М.А. Обобщённая постановка задачи прогнозирования и оптимального проектирования долговечности корродирующих конструкций с учетом нечеткого воздействия окружающей среды // Транспортные сооружения, Том 1, №3 (2014) <http://t-s.today/PDF/02TS314.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/02TS314

For citation:

Zhdanova M.A. [The generalized statement of problem on forecasting and optimal designing operational life of corrosive structures with account of fuzzy environmental effects] Russian journal of transport engineering, 2014, Vol. 1, no. 3. Available at: <http://t-s.today/PDF/02TS314.pdf> (In Russ.) DOI: 10.15862/02TS314

Адрес для связи с автором:

410054, Саратов, ул. Политехническая, 77

УДК 51-72:519.6

Жданова Марина Андреевна

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов
Аспирант
E-mail: mig0109@mail.ru

Обобщённая постановка задачи прогнозирования и оптимального проектирования долговечности корродирующих конструкций с учетом нечеткого воздействия окружающей среды

Аннотация. В статье рассматривается подход к построению модели корродирующих элементов конструкций (в частности, трубопроводного транспорта) при нечеткой информации о воздействии окружающей среды. В современных отраслях промышленности широкое использование получили механические системы, функционирующие в условиях агрессивного воздействия окружающей среды, в частности системы трубопроводного транспорта. Для того чтобы определить время для проведения запланированного ремонта таких систем, нужно принимать во внимание условия работы данного объекта. Таким образом, возникает вопрос о создании системы, учитывающей влияние всех внешних воздействий, а также позволяющей оценить состояние корродирующей конструкции на данный момент. Обычно при решении задачи оценки долговечности элементов корродирующих конструкций используется два подхода: детерминированный и вероятностный. Однако решение задачи в подобной постановке имеет скорее теоретическое, чем практическое значение, так как информация о параметрах внешней среды может быть неизвестна. Автором предлагается применение нечетких множеств для описания параметров внешней среды. Предложено поэтапное построение системы рассматриваемой модели. Полученная система обработки информации, благодаря использованию нечеткой логики, позволяет более точно учитывать и обрабатывать исходную информацию о работе объекта в любой момент времени, с учетом происходящих в ней процессов.

Ключевые слова: система; модель; корродирующие элементы; трубопровод; нечеткие параметры; фаззификация; нелинейное программирование; целевая функция

В современных отраслях промышленности широкое использование получили механические системы, функционирующие в условиях агрессивного воздействия окружающей среды, в частности системы трубопроводного транспорта. Для того чтобы определить время для проведения запланированного ремонта таких систем, нужно принимать во внимание условия работы данного объекта. При длительной работе технических объекты подвергаются комплексу воздействий, таких как температура, давление, агрессивная среда эксплуатации, влияние которых может привести к возникновению и росту повреждений и тем самым сокращению срока службы. Таким образом, возникает вопрос о создании системы, учитывающей влияние всех внешних воздействий, а также позволяющей оценить состояние корродирующей конструкции на данный момент.

В данной статье автором рассматривается обобщенная постановка задачи для прогнозирования работы и долговечности корродирующих конструкций в условиях агрессивной внешней среды. Задача весовой оптимизации формулируется в виде задачи нелинейного математического программирования. В качестве исследуемого объекта в данной статье рассматриваются элементы трубопроводной конструкции, работающие под действием агрессивных сред. Анализируя и обрабатывая исходную информацию о работе трубопровода, система предоставляет информацию о напряженно-деформированном состоянии, долговечности и оптимальных параметрах.

Процесс расчета долговечности корродирующих конструкций содержит в себе следующие этапы:

- Проверка данных эксперимента и выбор подходящей модели из имеющегося набора моделей коррозионного износа;
- Определение коэффициентов для рассматриваемой модели коррозионного износа по полученным в эксперименте данным;
- Создание методики и алгоритма расчета конструкции, разработка программы;
- Расчет и проверка результатов расчета, сравнение с экспериментом.

Постановка задачи определения долговечности корродирующей конструкции начинается с описания набора параметров, которые характеризуются числовыми значениями. При функционировании конструкции в агрессивной внешней среде возникает коррозия, которая, в свою очередь, приводит к изменению ее начальных параметров \bar{x}_0 . Но при изменении начальных параметров конструкция должна продолжать отвечать требованиям ограничения по прочности и устойчивости. Для прогнозирования ресурса корродирующей конструкции необходимо найти значение t^* -долговечности конструкции, времени, в течение которого она будет безотказно функционировать. Обобщенный вид модели коррозионного износа имеет вид:

$$\frac{d\delta}{dt} = f(t, \delta, T, \sigma, \bar{a}), \quad (1)$$

где t - время; T – температура, σ - напряжение, \bar{a} - вектор оцениваемых коэффициентов. Рассмотрим процедуру определения коэффициентов.

Процедура определения оцениваемых коэффициентов \bar{a} включают два этапа:

1. Рассматривается функция, которая может служить для оценки различия результатов расчета от исходных данных эксперимента - целевая функция $\Phi(a)$.

2. Находятся такие значения a^* вектора коэффициентов \bar{a} , при которых целевая функция $\Phi(a^*)$ достигает максимума или минимума, как условлено.

Обобщенная постановка задачи прогнозирования долговечности корродирующей конструкции может быть представлена в виде:

$$t^* = \min_{i=1, N} \{t_i\} . \quad (2)$$

где t^* – значение долговечности, которое необходимо найти; N – число элементов в конструкции; t_i – долговечность каждого i -го элемента рассматриваемой системы, который определяется условиями прочности и устойчивости:

$$\begin{cases} [\sigma] - \sigma_i(t, v_0) = 0; & i = 1, N \\ \sigma_j^*(t) - \sigma_j(t, v_0) = 0; & j \in J \end{cases} , \quad (3)$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение; $\sigma_i(t)$ – текущее напряжение в i -м элементе системы; σ_j^* – критическое напряжение потери устойчивости; v_0 – скорость коррозии при отсутствии напряжений; J – множество элементов системы, которые работают на сжатие.

Если учитывать при разработке модели коррозионного износа конструкции влияние механических напряжений на скорость коррозии, то это приведет к появлению обратной связи в схеме решения задачи прогнозирования долговечности (рис. 1).

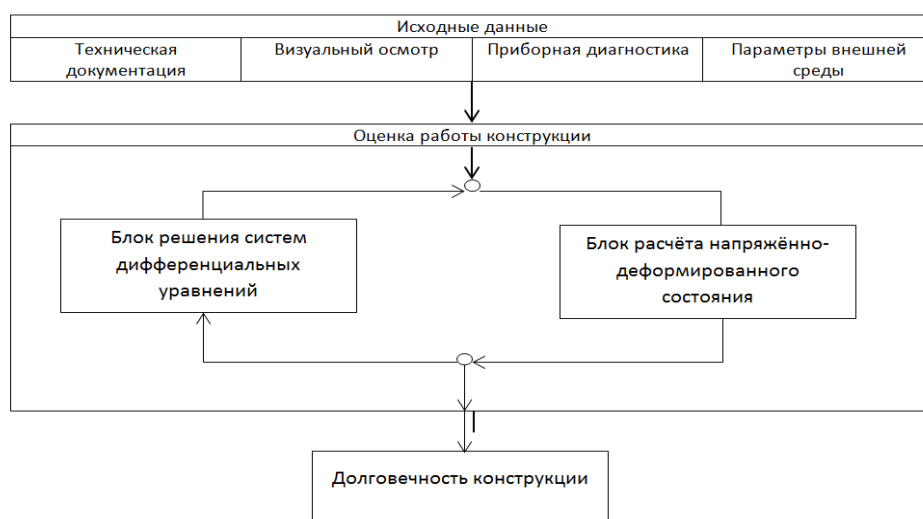


Рис. 1. Схема решения задачи прогнозирования долговечности (составлено автором)
 [Fig.1. The scheme for solving problem of the operational life forecasting]

Блок формирования входных данных предоставляет информацию об условиях работы элементов трубопровода и свойствах материалов. Отдельно следует остановиться на пункте «Параметры внешней среды». Обычно при решении задачи оценки долговечности элементов корродирующих конструкций используется два подхода: детерминированный и вероятностный. Однако решение задачи в подобной постановке имеет скорее теоретическое, чем практическое значение, так как информация о параметрах внешней среды может быть

неизвестна. В реальных условиях параметры внешней среды зависят от множества факторов, таких как температура, влажность и других. Автором предлагается применение нечетких множеств для описания параметров внешней среды [3]. В настоящее время при моделировании поведения сложных систем использование нечётких множеств [1] позволяет решать самые разнообразные задачи [2].

Особенностью данной работы является то, что факторы внешней среды принимаются как величины, информация о которых является неточной. Учет воздействия агрессивных сред вносит определенные трудности в расчет элементов конструкций, так как их влияние носит объемный характер, причем изменяется с течением времени. Скорости процессов проникания агрессивных сред в конструкции и взаимодействия с ними нередко весьма малы, поэтому изменение физико-механических свойств по объему конструкции имеет нестационарный характер и может продолжаться в течение всего срока ее эксплуатации [11].

В работе [82] справедливо отмечалось, что, в силу ряда объективных причин, пока еще нет достаточно надежной физической теории, которая позволила бы корректно описать поведение материалов в агрессивных средах. К настоящему времени ситуация не очень изменилась, поэтому и сейчас возникает необходимость использовать феноменологический подход при построении математических моделей поведения конструкций, учитывающих влияние агрессивной среды. При построении моделей деформирования и разрушения конструкций в присутствии агрессивной среды возможно использование нечеткой логики.

Теория нечетких (размытых) множеств была впервые предложена американским математиком Лотфи Заде в 1965 г. и использовалась для преодоления трудностей представления неточных понятий, анализа и моделирования систем, в которых участвует человек [1].

Подход к расчету на основе теории нечетких множеств является альтернативой количественным методам анализа систем. Численное значение функции принадлежности характеризует степень принадлежности каждого элемента некоторому нечеткому множеству, которое является в естественном языке некоторой, как правило, элементарной характеристикой явления (степени обводненности продукции газовых скважин, степени загрязненности участка газопровода, степени эффективности режима, и т.д.) [1].

Обозначим через $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ универсальное множество (универсум, или область определения задачи), тогда нечеткое множество (НМ) A на U может быть представлено в виде $A = \{f_A(u_1)/u_1 + \dots + f_A(u_n)/u_n\}$, где f_A обозначает функцию принадлежности введенного в рассмотрение множества A , $f_A: U \rightarrow [0, 1]$, $f_A(u_i)$ выражает степень принадлежности элемента $u_i \in U$ нечеткому множеству A ; в данном случае, символ $+$ используется не в качестве обозначения стандартной арифметической операции, а для обозначения совокупности упорядоченных пар элементов (синглтонов), образующих множество A .

Фазификацией называется процесс нахождения значений функций принадлежности нечетких множеств (термов) на основе обычных (не нечетких) исходных данных, т.е. определение степени принадлежности исходных данных каждому из соответствующих нечетких множеств.

Дефазификация представляет собой процедуру нахождения обычного (не нечеткого) значения для лингвистического термина, представленного в виде функции принадлежности; другими словами, дефазификацией называется преобразование нечеткой величины в четкую (точную) величину. В частности, одним из наиболее часто используемых методов дефазификации является центр оид площади (центр тяжести), вычисляющий абсциссу точки,

через которую проходит вертикальная линия, делящая нечеткое множество (площадь фигуры, ограниченной функцией принадлежности) на две равные массы.

Если рассмотреть скорость коррозии при отсутствии напряжений v_0 , то становится очевидным, что его значение не может быть однозначно определено. В условиях агрессивной этот параметр зависит от целого ряда факторов: температуры, её влажности, степени насыщенности различными элементами и других. С одной стороны, количественные характеристики всех этих факторов с трудом поддаются определению, с другой параметры внешней среды могут изменяться в широком диапазоне в течение всего срока эксплуатации и влиять на долговечность конструкции в целом [2]. При моделировании надежности и устойчивости конструкции может быть известна только та или иная степень агрессивности, которую возможно описать с помощью лингвистической переменной. Поскольку процесс коррозии настолько сложен и однозначно не определен, что не поддается точному количественному описанию, то использование лингвистической переменной («неагрессивная», «слабоагрессивная», «низкоагрессивная», «среднеагрессивная», «высокоагрессивная» и «сильноагрессивная») оказывается вполне уместным [7].

Скорость коррозии в данном случае мы можем задать некоторым интервалом $v_0 \in [v_0^-; v_0^+]$, границы которого определяются значением лингвистической переменной – «степень агрессивности среды». С использованием прямых экспертных оценок этот параметр может быть представлен как нечёткое число с заданной функцией принадлежности [3]:

$$\tilde{v}_0 = \sum_{i=1}^{2 \cdot N_{\alpha} - 1} \frac{\mu(v_0^i)}{v_0^i}, \quad v_0^i \in [v_0^-; v_0^+],$$

$$\mu(v_0^i) = \begin{cases} 0, & v_0^i \notin [v_0^-; v_0^+]; \\ \cos \left(\pi \cdot \frac{v_{cp} - v_0^i}{v_0^+ - v_0^-} \right), & v_0^i \in [v_0^-; v_0^+], \end{cases} \quad (4)$$

где $v_{cp} = \frac{v_0^+ + v_0^-}{2}$. В формуле (4) символ Σ обозначает дискретное нечёткое множество [6].

Каждому элементу кортежа v_0^i будет соответствовать значение долговечности t^i , всё множество которых образует кортеж значений долговечности \tilde{t} . Он, в свою очередь, по определённому правилу преобразуется к чёткому числу $t = t_{def}$, операцией дефuzziфикации

$$t = t_{def} = \frac{\sum_{i=1}^{2 \cdot N_{\alpha} - 1} t^i \cdot \mu(t^i)}{\sum_{i=1}^{2 \cdot N_{\alpha} - 1} \mu(t^i)}, \quad (5)$$

где $t^i \in [t^-; t^+]$.

Обработка исходных данных происходит во втором блоке. На основе анализа информации о работе элементов конструкции возникает необходимость выбора и адаптации расчетной схемы модели [3]. Существующие на сегодняшний день подходы к оценке и моделированию работы сложных механических систем и их элементов позволяют спрогнозировать сроки их эксплуатации. В данной работе автором предлагается использование для моделирования коррозии модели И.Г. Овчинникова.

В работах И.Г. Овчинникова и В.В. Петрова с сотрудниками рассматривается проблема моделирования процессов коррозии. В предложенных ими математических моделях коррозионного износа было учтено влияние не только напряжённого, но и деформированного состояния конструкционного элемента на скорость протекания процесса [7]. Зависимость скорости коррозионного износа от удельной энергии деформирования \mathcal{E} была доказана И.Г. Овчинниковым, что также нашло отражение при разработке математических моделей:

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0 (1 + k\mathcal{E}). \quad (6)$$

в этих формулах δ - глубина коррозии, t - время, \mathcal{E} – удельная энергия, v_0 - скорость коррозии, k - коэффициент [9].

Определение долговечности корродирующей конструкции состоит в оценке прогнозируемого значения долговечности каждого элемента, а, следовательно, и всей системы в целом.

Для определения оптимальных параметров корродирующей конструкции ее описывают рядом независимых параметров, каждый из которых характеризуется численным значением. Количество параметров, описывающих систему, должно быть минимальным, но достаточным для полного описания работы системы [7]. Параметры моделируемой системы должны описывать её существенные характеристики (быть значимыми), при этом их количество должно быть минимальным, но, с точки зрения поставленной задачи, достаточным для описания системы. При этом система может быть описана как постоянными величинами (неизменными во время эксплуатации, что обусловлено технологическими требованиями), так и параметры, которые могут меняться в результате работы конструкции. На различные значения оптимизируемых параметров могут быть наложены ограничения, определяющие возможные границы их изменения.

Несмотря на то, что прикладные задачи относятся к различным областям науки, они имеют общую форму [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Таким образом, все задачи можно классифицировать в виде задач минимизации вещественной функции $V(\bar{x})$ n -мерного векторного аргумента $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, компоненты которого удовлетворяют системе уравнений $h_k(x) = 0$, набору неравенств $g_i(x) \geq 0$, а также ограничены снизу и сверху, то есть $x_i^- \leq x_i \leq x_i^+$. Задача определения оптимальных параметров \bar{x}^* сводится к задаче нелинейного математического программирования:

$$V(\bar{x}) \rightarrow \text{extr}, \quad \bar{x} \in X_G, \quad (7);$$

где $X_G = \{\bar{x} \in E^n \mid g_i(x) \geq 0, h_k(x) = 0, i \in [1, N], k \in [1, M]\}$, X_G – допустимая область решения задачи оптимизации; E^n – пространство, в котором определена целевая функция $V(\bar{x})$; $g_i(x)$ и $h_k(x)$ – функции ограничений (ФО). Вектор $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$

будем называть вектором варьируемых параметров, уравнения $h_k(x) = 0$ – ограничениями в виде равенств, а неравенства $g_i(x) \geq 0$ – ограничениями в виде неравенств.

Принимая во внимание область применения рассматриваемой системы, формулируется целевая функция. Ограничения-неравенства, которые имеют вид $x_i \geq x_i^-$ или $x_i \leq x_i^+$, где x_i^- , x_i^+ – заданные константы, называются прямыми, а все остальные ограничения являются функциональными [4].

Рассмотрим конструкцию, состоящая из нескольких (N) элементов, часть которых работает на растяжение, часть – на сжатие. Задачей определения оптимальных параметров является определение геометрических параметров элементов, что объем конструкции был минимальным, сохраняя при этом заданную устойчивость и надежность.

$$\begin{aligned}
 & V(\bar{x}) \rightarrow \min \\
 & \left\{ \begin{array}{l} g_1 : [\sigma] - \sigma_i(\bar{x}, t^*, v_0) \geq 0; \quad i = \overline{1, N} \\ g_2 : \sigma_j^*(\bar{x}, t^*, v_0) - \sigma_j(\bar{x}, t^*, v_0) \geq 0; \quad j \in J \\ x_l \in [x_l^-; x_l^+]; \quad l = \overline{1, L} \end{array} \right. \quad (8);
 \end{aligned}$$

где $V(\bar{x})$ – искомый оптимальный объем корродирующей конструкции (значение целевой функции); \bar{x} – вектор переменных параметров; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение; $\sigma_i(\bar{x}, t^*, v_0)$ – текущее напряжение в i -м элементе конструкции; $\sigma_j^*(\bar{x}, t^*, v_0)$ – критическое напряжение потери устойчивости; N – количество элементов в системе; L – количество варьируемых параметров; x_l^+ , x_l^- – соответственно верхняя и нижняя границы изменения l -го варьируемого параметра; t^* – заданная долговечность; g_1 – ограничения по прочности; g_2 – ограничения по устойчивости.

Вид критерия оптимальности в обобщенной постановке не влияет на функции ограничений, обеспечивающих функциональную способность конструкции в процессе эксплуатации [6].

Тогда постановка задачи определения оптимальных параметров элементов корродирующей конструкции при нечетких параметрах агрессивной среды имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & V(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N l_i \cdot A_i(\bar{x}) \rightarrow \min \\
 & \left\{ \begin{array}{l} g_1 : [\sigma] - \sigma_i(\bar{x}, t^*, \tilde{v}_0) \geq 0; \quad i = \overline{1, N} \\ g_2 : \sigma_j^*(\bar{x}, t^*, \tilde{v}_0) - \sigma_j(\bar{x}, t^*, \tilde{v}_0) \geq 0; \quad j \in J \\ x_l \in [x_l^-; x_l^+]; \quad l = \overline{1, L} \end{array} \right. \quad (9)
 \end{aligned}$$

Схема решения задачи оптимизации при нечетких параметрах агрессивной среды приведена на рис. 2.

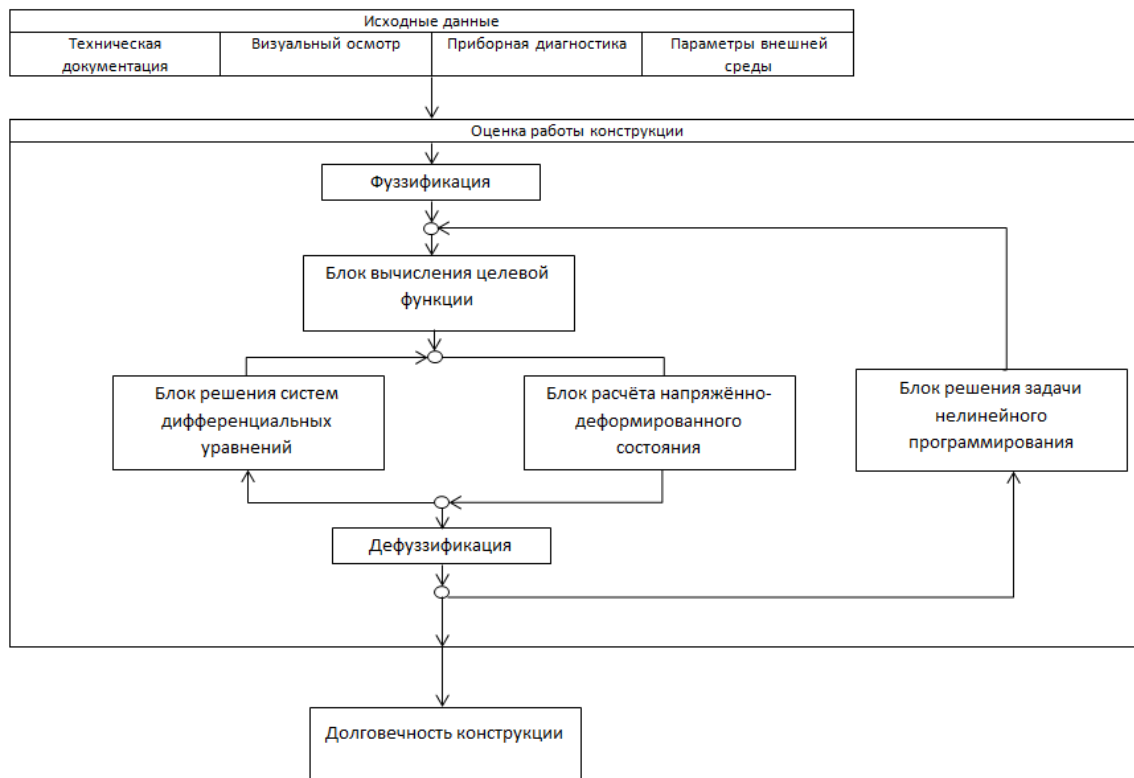


Рис. 2. Схема решения задачи оптимизации при нечётких параметрах (составлено автором)

[Fig.2. The scheme for solving the optimization problem ay the fuzzy parameters/

Анализ получаемого значения долговечности позволяет сделать вывод о выполнении или нарушении ограничений для данного вектора варьируемых параметров.

Информация о состоянии элементов конструкции, полученная в результате работы системы, схема которой представлена на рисунке 2, позволяет получить информацию о долговечности конструкции, а также определить оптимальных параметры объекта [9].

Предложенная система обработки информации, благодаря использованию нечеткой логики, позволяет более точно учитывать и обрабатывать исходную информацию о работе объекта в любой момент времени, с учетом происходящих в ней процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заде, Л.А. Нечёткие множества [Текст] / Лотфи Аскар Заде // Информация и управление. - 1965. - Т. 8, Вып. 3. - С. 338-353.
2. Зеленцов, Д.Г. Моделирование нечётких ограничений в задачах оптимизации корродирующих конструкций [Текст] / Д.Г. Зеленцов, Л.И. Короткая. // Проблемы информационных технологий - 2010. - №1 (007). – С.26 – 31.
3. Зеленцов, Д.Г. Оптимальное проектирование корродирующих конструкций при нечётко заданных функциях ограничений [Текст] / Д.Г. Зеленцов, Н.Ю. Науменко, Л.И. Короткая // Прикладные задачи математики и механики: XVIII международная научно-техническая конференция, 13-17 сентября 2010 г: тезисы докл. – Севастополь: СевНТУ, 2010. – С. 169 – 171.
4. Короткая, Л.И. Повышение эффективности вычислительных методов моделирования поведения корродирующих конструкций [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 01.05.02 / Л.И. Короткая - Дн-ск, 2012. - 144 с.
5. Науменко, Н.Ю. Адаптированные конечно-элементные модели решения задач строительной механики плосконапряжённых корродирующих пластин [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Науменко Наталья Юрьевна – К., 2008. – 187 с.
6. Овчинников, И.Г. О задачах оптимального проектирования конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред [Текст] / И.Г. Овчинников // Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1988. – № 9. – С. 17 – 22.
7. Петров, В.В. Расчёт элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой [Текст] / В.В. Петров, И.Г. Овчинников, Ю.М. Шихов. – Саратов: Сарат. ун-т, 1987. – 288 с.
8. Пономарева М.А. Применение нечеткой логики для решения технических задач - «Инновационные технологии в обучении и производстве». Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции г. Камышин, 15–16 декабря 2009 г. –С. 149-153
9. Пономарева М.А. Анализ существующих методик для оценки надежности трубопровода - Материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. «Современные научные исследования в дорожном и строительном производстве». Том 2. С.122-127,2010
10. Радуль, О.А. Несущая способность и оптимальное проектирование стержневых конструкций с учётом общей и локальной коррозии [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Радуль Оксана Анатольевна – Днепропетровск, 2009. – 172

Zhdanova Marina Andreevna

Yuri Gagarin state technical university of Saratov , Russia, Saratov

E-mail: mig0109@mail.ru

The generalized statement of problem on forecasting and optimal designing operational life of corrosive structures with account of fuzzy environmental effects

Abstract. The article discusses the approach to building the model of the corrosive structural elements (such as pipeline transport) with fuzzy information about the impact of environment. In the advanced industries the mechanical systems operating under the aggressive environmental influences, in particular the systems of pipeline transport, have received the extensive use. In order to determine the time for the planned repair of these systems, it is necessary to take into account the working conditions of the given object. Thus, the question arises as to creating a system that takes into account all environmental effects, as well as permitting to evaluate the state of corroding construction at this time. Generally, in solving a problem of the operational life evaluation for the corrosive structure elements two approaches are used: deterministic and probabilistic ones. However, the solution of problem in these circumstances has more theoretical than practical meaning, since the information on the environment parameters may be unknown. The author proposes the use of fuzzy sets to describe the environment parameters and step-by-step building the system of model under consideration. Through fuzzy logic the resulting system of information processing allows one more accurately to take into account and process input information on the work of object at any time with consideration of the processes occurring in it.

Keywords: system; model; corrosive elements; pipeline; fuzzy parameters; fuzzification; nonlinear programming; objective function

REFERENCES

1. Zade, L.A. Nechetkie mnozhestva [Tekst] / Lotfi Askar Zade // Informatsiya i upravlenie. - 1965. - T. 8, Vyp. 3. - S. 338-353. [Zade, L.A. Nechjotkie mnozhestva [Fuzzy sets], Informacija i upravlenie, 1965.]
2. Zelentsov, D.G. Modelirovanie nechetkikh ograniceniy v zadachakh optimizatsii korrodiruyushchikh konstruktsiy [Tekst] / D.G. Zelentsov, L.I. Korotkaya. // Problemi informatsiynikh tekhnologiy - 2010. - №1 (007). - S.26 – 31.[Zelencov, D.G. Modelirovanie nechjotkih ogranicenij v zadachah optimizacii korrodirujushhih konstrukcij [Simulation of fuzzy constraints in optimization problems corrosive designs] Problemi informacijnih tekhnologij, 2010]
3. Zelentsov, D.G. Optimal'noe proektirovanie korrodiruyushchikh konstruktsiy pri nechetko zadannykh funktsiyakh ograniceniy [Tekst] / D.G. Zelentsov, N.Yu. Naumenko, L.I. Korotkaya // Prikladnye zadachi matematiki i mekhaniki: XVIII mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya, 13-17 sentyabrya 2010 g: tezisy dokl. – Sevastopol': SevNTU, 2010. – S. 169 – 171. [Zelencov, D.G. Optimal'noe proektirovanie korrodirujushhih konstrukcij pri nechjotko zadannykh funktsijah ogranicenij [Optimal design of structures under corrosive fuzzy set functions restrictions] Prikladnye zadachi matematiki i mehanik, 2010]
4. Korotkaya, L.I. Povyshenie effektivnosti vychislitel'nykh metodov modelirovaniya povedeniya korrodiruyushchikh konstruktsiy [Tekst]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 01.05.02 / L.I. Korotkaya - Dn-sk, 2012. - 144 s. [Korotkaja, L.I. Povyshenie jeffektivnosti vychislitel'nyh metodov modelirovaniya povedeniya korrodirujushhih konstrukcij [Improving the efficiency of computational methods for modeling the behavior of corrosive designs] Dnepropetrovsk, 2012]
5. Naumenko, N.Yu. Adaptirovannye konechno-elementnye modeli resheniya zadach stroitel'noj mekhaniki ploskonapryazhennykh korrodiruyushchikh plastin [Tekst]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.17 / Naumenko Natal'ya Yur'evna – K., 2008. – 187 s. [Naumenko, N.Ju. Adaptirovannye konechno-jelementnye modeli reshenija zadach stroitel'noj mehaniki ploskonapryazhjonnyh korrodirujushhih plastin [Adapted finite-element models for solving structural mechanics ploskonapryazhennyh corrosive plates], 2008]
6. Ovchinnikov, I.G. O zadachakh optimal'nogo proektirovaniya konstruktsiy, podvergayushchikhsya vozdeystviyu agressivnykh sred [Tekst] / I.G. Ovchinnikov // Izv. VUZov. Stroitel'stvo i arhitektura. – 1988. – № 9. – S. 17 – 22. [Ovchinnikov, I.G. O zadachah optimal'nogo proektirovaniya konstrukcij, podvergayushhihsja vozdejstviju agressivnyh sred [About the problems of optimum design of structures exposed to corrosive environments] Stroitel'stvo i arhitektura, 1988]
7. Petrov, V.V. Raschet elementov konstruktsiy, vzaimodeystvuyushchikh s agressivnoj sredoy [Tekst] / V.V. Petrov, I.G. Ovchinnikov, Yu.M. Shikhov. – Saratov: Sarat. un-t, 1987. – 288 s. [Petrov, V.V. Raschjot jelementov konstrukcij, vzaimodejstvujushhih s agressivnoj sredoj [Calculation of structural elements, interacting with the dirty environment], Saratov, 1987]

8. Ponomareva M.A. Primenenie nechetkoy logiki dlya resheniya tekhnicheskikh zadach - «Innovatsionnye tekhnologii v obuchenii i proizvodstve». Materialy VI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii g. Kamyshin, 15–16 dekabrya 2009 g. –С. 149-153 [Ponomareva M.A. Primenenie nechetkoj logiki dlja reshenija tehicheskikh zadach [The use of fuzzy logic to solve the technical problems], Kamyshin, 2009]
9. Ponomareva M.A. Analiz sushchestvuyushchikh metodik dlya otsenki nadezhnosti truboprovoda - Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem. «Sovremennye nauchnye issledovaniya v dorozhnom i stroitel'nom proizvodstve». Tom 2. S.122-127,2010 [Ponomareva M.A. Analiz sushhestvujushhih metodik dlja ocenki nadezhnosti truboprovoda [Analysis of existing methodologies to assess the reliability of the pipeline], Sovremennye nauchnye issledovaniya v dorozhnom i stroitel'nom proizvodstve? 2010]
10. Radul', O.A. Nesushchaya sposobnost' i optimal'noe proektirovanie sterzhnevyykh konstruktsiy s uchetom obshchey i lokal'noy korrozii [Tekst]: dis. ... kand..tekh. nauk: 05.23.17 / Radul' Oksana Anatol'evna – Dnepropetrovsk, 2009. – 172 [Radul', O.A. Nesushhaja sposobnost' i optimal'noe proektirovanie sterzhnevyykh konstrukcij s uchjotom obshhej i lokal'noj korrozii [Carrying capacity and optimal design of beam structures, taking into account general and localized corrosion] Dnepropetrovsk, 2009]