

УДК 624.046.5

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ДОЛГОВЕЧНОСТИ  
КОРРОДИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Д. Г. Зеленцов, Л. И. Короткая**

ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепропетровск  
пр. Гагарина, 8, г. Днепропетровск, 49005, Украина. E-mail: [ugxtu@dicht.dp.ua](mailto:ugxtu@dicht.dp.ua)

Проведен анализ различных математических моделей решения задачи долговечности корродирующих конструкций в условиях неполной информации о поведении агрессивной среды. Предлагается альтернативный подход, основанный на использовании интервальной математики, позволяющий формализовать нечеткие исходные данные с помощью принципа обобщения. Получены параметры численного интегрирования с использованием нейронных сетей.

**Ключевые слова:** нейронные сети, интервальная математика, математическое программирование.

**USE OF NEURAL NETWORKS AT THE DECISION OF PROBLEMS DURABILITY OF DESIGNS SUBJECT TO CORROSION**

**D. G. Zelentsov, L. I. Korotkaya**

SHEI "The Ukrainian state himiko-technological university", Dnepropetrovsk  
Pr. Gagarin, 8, Dnepropetrovsk, 49005, Ukraine. E-mail: [ugxtu@dicht.dp.ua](mailto:ugxtu@dicht.dp.ua)

The analysis of various mathematical models of the decision of a problem of durability the designs subject to corrosion in the conditions of the incomplete information on behavior of an excited environment is passed. The alternative approach based on use of the interval mathematics which allows to formalize the indistinct initial data by means of a generalization principle is offered. Parameters of numerical integration with use of neural networks are received.

**Key words:** neural networks, the interval mathematics, mathematical programming.

**ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ПРИ РОЗВ'ЯЗАННІ ЗАДАЧ ДОВГОВІЧНОСТІ  
КОРОДУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ**

**Д. Г. Зеленцов, Л. І. Коротка**

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпропетровськ  
пр. Гагаріна, 8, г. Дніпропетровськ, 49005, Україна. E-mail: [ugxtu@dicht.dp.ua](mailto:ugxtu@dicht.dp.ua)

Проведений аналіз різних математичних моделей розв'язання задачі довготривалості кородуючих конструкцій в умовах неповної інформації про поведінку агресивного середовища. Пропонується альтернативний підхід, який базується на використанні інтервальної математики, дозволяючий формалізувати нечіткі вхідні данні за допомогою принципу узагальнення. Отримані параметри чисельного інтегрування з використанням нейронних мереж.

**Ключові слова:** нейронні мережі, інтервальна математика, математичне програмування.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Проблемам моделирования коррозионных процессов в элементах конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах, за последние десятилетия уделяется значительное внимание [1, 2]. Несмотря на большой интерес, они далеки от своего завершения, многие вопросы не получили достаточного освещения.

Традиционные подходы к решению задачи долговечности имеют ряд существенных недостатков. В данной работе в качестве параметра агрессивной среды рассматривается скорость коррозии, которая ранее принимавшаяся как точечная величина. Но так как параметры агрессивной среды зависят от многих факторов и с трудом поддаются количественному описанию, то в действительности скорость коррозии представляет собой не точечную величину, а величину, распределенную на некотором интервале. Границы интервала считаются известными исходя из значений лингвистической переменной – степени агрессивности среды (рис. 1).

Целью данной работы является целесообразность замены точечных оценок интервальными: границы интервала будут определяться средним значением скорости коррозии  $v_0$  и ее вариацией  $dv$ . Таким обра-

зом, параметр  $v_0$  следует рассматривать не как точечную величину, а величину, распределенную на некотором интервале:  $v_0 \in [n^-, n^+] = [v_0 - dv; v_0 + dv]$ . Предполагается, что неизвестное истинное значение этой величины достоверно лежит внутри указанного интервала.



Рисунок 1 – Лингвистическая переменная

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Ввиду того, что скорость коррозии описана с помощью лингвистической переменной, то ее значение в процессе эксплуатации конструкции может изменяться в известных пределах. Этот интервал трактуется как множество возможных значений величины скорости коррозии, которая рассматривается как нечеткое число с заданной кусочно-непрерывной

функцией принадлежности. Принцип обобщения Заде позволяет найти указанную функцию нечеткого числа, но сопряжен с определенными трудностями. Поэтому в данной работе применяется более практичный с точки зрения реализации  $\alpha$ -уровневый принцип обобщения (далее фуззификация).

Предлагается задавать параметр агрессивной среды шестью  $\alpha$ -уровнями:  $\{0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1\}$ . При этом в качестве функции принадлежности используется функция вида (1) (рис. 2).

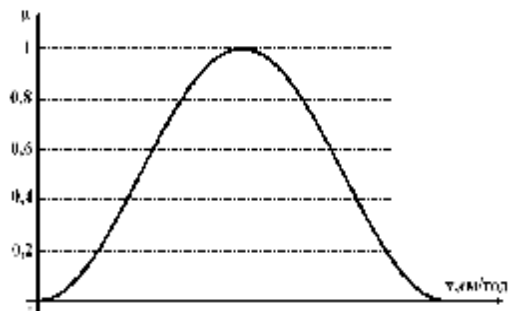


Рисунок 2 – Разбиение по  $\alpha$ -уровням

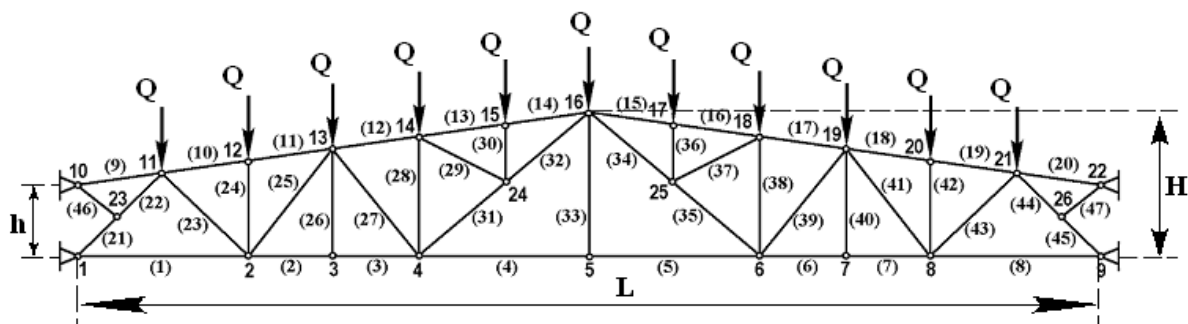


Рисунок 3 – Расчётная схема фермы

Влияние напряжений на скорость коррозии приводит, во-первых, к возникновению обратной связи в модели расчёта и, во-вторых, к тому, что количество параметров, определяющих геометрические размеры конструкции, может достигать несколько десятков, а иногда и сотен. Этим количеством и определяется размерность системы дифференциальных уравнений (СДУ), описывающей коррозионный процесс в конструкции в целом.

В этом случае поведение конструкции в произвольный момент времени может быть описано с помощью СДУ следующего вида:

$$\frac{dA}{dt} = \tilde{v}_0 [I + k \cdot S(A)] \quad (3)$$

Здесь  $\tilde{v}_0 = [v_1, v_2, \dots, v_{11}]$  – кортеж скоростей коррозии;  $A$  – матрица геометрических характеристик размерности  $m \times n$ ;  $m$  – количество элементов в системе;  $n$  – количество параметров, определяющих размеры элемента.

Долговечность конструкции будет определяться моментом времени  $t^*$ , когда напряжение в каком-либо элементе достигнет предельно допустимого

$$m(v) = \frac{1}{2} [\cos(p - n) + 1]. \quad (1)$$

В качестве объекта исследований рассматривалась 47-ми элементная ферма (рис. 3). Предполагалось, что степень агрессивности среды характеризуется значением лингвистической переменной «сильноагрессивная» ( $v_0 > 0,1 \text{ см/год}$ ).

Будем полагать, что напряжения влияют на скорость коррозии в элементах конструкции. Модель коррозионного износа примем в виде:

$$\frac{dd}{dt} = v_0 (1 + kS), \quad (2)$$

где  $d$  – глубина коррозионного поражения;  $v_0$  – скорость коррозии при отсутствии напряжений;  $S$  – напряжение;  $k$  – коэффициент влияния напряжений;  $t$  – время.

значения:

$$\max \left\{ S_i \left( A(t^*) \right) \right\} = [S]; \quad i = \overline{1, m} \quad (4)$$

Значение  $t^*$  не может быть непосредственно найдено из решения уравнения (4). Для его определения используется формула

$$t^* = \sum_{s=1}^N Dt^s + Dt^N \cdot Q; \quad Q \in (0, 1) \quad (5)$$

где  $Dt$  – шаг интегрирования системы (3);  $N$  –

$$\max \left\{ S_i \left( A^N \right) \right\} > [S] \quad (\text{рис. 4}).$$

При этом на каждой итерации происходит перепределение матрицы параметров конструкции:

$$A_{ij}^s = A_{ij}^{s-1} + \Delta t^s \cdot \tilde{v}_0 \cdot (1 + k \cdot S_i \cdot (A)^{s-1}). \quad (6)$$

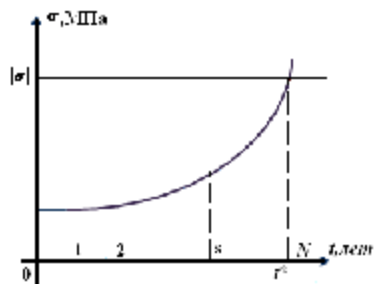


Рисунок 4 – Изменение напряжений с течением времени

Алгоритм решения задачи может быть представлен схемой, приведенной на рис. 5. Он предполагает решение задачи напряженно-деформированного состояния (модуль {A}) и решение СДУ вида (3) (модуль {B}). Модули {F} и {DF} - соответственно фуззификация скорости коррозии и дефуззификация значения долговечности.

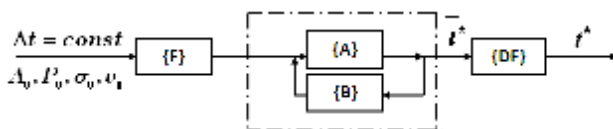


Рисунок 5 – Схема решения задачи долговечности

Результатом решения задачи долговечности является кортеж значений долговечности, соответствующий кортежу скоростей коррозии. Окончательное значение долговечности конструкции может быть получено после выполнения операции дефуззификации.

Очевидно, что на точность решения задачи существенное влияние оказывает выбор конкретного значения шага интегрирования СДУ (3). Для получения количественной оценки погрешности получаемого решения необходимо иметь так называемое эталонное решение, т. е. полученное точно или с контролируемой погрешностью.

Такое решение может быть получено при допущении, что с течением времени усилия в элементах конструкции постоянны. В [3] получены аналитические формулы, позволяющие определить долговечность корродирующего стержня произвольного сечения при осевом нагружении:

$$t_{ан}^* = t_0 - \frac{2kQ}{v_0 d_1} \left\{ \arctg \frac{2ad + b}{d_1} - \arctg \frac{b}{d_1} \right\} \quad (7)$$

$$t_{ан}^* = t_0 - \frac{2kQ}{v_0 d_2} \ln \left\{ \frac{(2ad + b - d_2)(b + d_2)}{(2ad + b + d_2)(b - d_2)} \right\} \quad (8)$$

Здесь  $F_0$ ,  $P_0$  – площадь и периметр сечения в начальный момент времени;  $Q$  – величина осевого

усилия;  $t_0 = \frac{d(t^*)}{v_0}$ ;  $a = s$  – коэффициент формы

сечения;  $b = -P_0$ ;  $c = F_0 + kQ$ ;  $d_1 = \sqrt{4ac - b^2}$ ;

$d_2 = \sqrt{b^2 - 4ac}$ ;  $d(t^*)$  – глубина коррозионного износа, соответствующая предельному значению напряжения.

В табл. 1 приведены результаты аналитического решения задачи для элемента фермы, которым определяется её долговечность, и численного решения при различных значениях шага интегрирования. Эти данные не являются результатами решения задачи долговечности фермы, т. к. в элементах конструкции со временем происходит изменение осевых усилий. Но они дают возможность исследовать погрешности решения.

Исходные данные для численного эксперимента принимались следующие:  $v_0^- = 0,07$  см/год;  $v_0^+ = 0,13$  см/год;  $k = 0,003$  МПа<sup>-1</sup>;  $L = 3600$  см;  $h = 220$  см;  $H = 440$  см; нагрузка, приложенная в узлах фермы  $Q = 25$  кН.

Таблица 1 – Результаты решения задачи долговечности

$v_0$ , см/год	$t_{ан}$ , лет	$Dt = 0,125$ , г.		$Dt = 0,25$ , г.	
		$t_{числ}$ , лет	$\epsilon$	$t_{числ}$ , лет	$\epsilon$
0,070	3,395	3,515	0,0353	3,609	0,0630
0,079	3,008	3,131	0,0408	3,225	0,0721
0,083	2,863	2,979	0,0405	3,066	0,0706
0,087	2,731	2,852	0,0441	2,925	0,0708
0,091	2,611	2,725	0,0436	2,806	0,0746
0,100	2,376	2,488	0,0470	2,569	0,0811
0,109	2,180	2,292	0,0513	2,360	0,0825
0,113	2,103	2,212	0,0517	2,285	0,0866
0,117	2,031	2,143	0,0550	2,221	0,0936
0,121	1,964	2,075	0,0569	2,155	0,0997
0,130	1,828	1,934	0,0578	2,001	0,0947

Дефуззифицированные значения долговечности для  $Dt = 0,125$  и  $Dt = 0,25$  года соответственно равны: 2,768 и 2,841 лет.

Как видно из приведенных результатов, погрешности численного решения существенно изменяются в зависимости от величины шага интегрирования и скорости коррозии. В связи с этим оценка погрешности значения долговечности конструкции, определённого в процессе дефуззификации, например, центроидным методом [4], весьма затруднительна. Она могла быть получена, если бы для всех значений кортежа скоростей коррозии решение задачи получалось с примерно одинаковой погрешностью, не превосходящей заданную величину. Однако в этом случае для каждого значения  $v_0$  из заданного кортежа следует принимать своё значение шага интегрирования, которое заранее неизвестно. Более того, до настоящего времени не существовало каких-либо обоснованных рекомендаций по выбору

значення цього параметра численного інтегрування СДУ, описують корозійний процес.

Ізвестно, що на вибор шага інтегрування, забезпечуючого задану точність рішення, оказують вплив багато факторів, в том числі швидкість корозії. Описати це вплив з допомогою аналітичних функцій не представляється можливим. С другої сторони, для коректного рішення поставленої задачі необхідний алгоритм, дозволяючий визначити довжину шага інтегрування на основі інформації о початкових геометричних характеристиках сечень стержнів, початкових напруженнях, швидкості корозії і заданої погрешності вирахування.

В якості регулятора, дозволяючого визначити численні параметри інтегрування з заданою погрешністю, пропонується використовувати навчальну нейронну мережу (НС) (рис. 6).

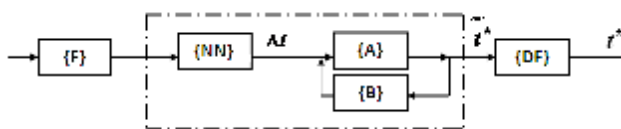


Рисунок 6 – Схема рішення задачі довговечності з використанням нейронної мережі

Для представлення функцій багатьох змінних використана мережа, що має один прихований шар з архітектурою 5-7-1 (рис. 7), що дозволяє для кожного значення вектора швидкості корозії (т.е. на кожному  $\alpha$ -рівні) отримувати крок інтегрування з заданою погрешністю.

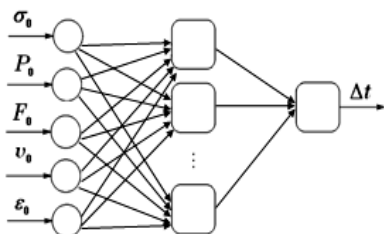


Рисунок 7 – Архітектура НС

Навчання НС вироблялося методом зворотного розповсюдження. Процедура отримання навчальних зразків використовувала аналітичні формули для визначення довговечності корозійуючих стержневих елементів.

В табл. 2 представлені результати рішення задачі довговечності з використанням НС. Значення погрешності рішення приймається рівним 0,02. Виходячи з цього значення, а також початкових геометричних характеристик і напружень в стержнях НС визначалося необхідне значення кроку інтегрування СДУ.

Отримане дефюзифіковане значення довговечності  $t_{\text{деф}} = 2,713$  років. В цьому випадку можна утвердити, що погрешність цього рішення становить 0,02.

Таблиця 2 – Результати рішення задачі довговечності з використанням НС

$v_0$ , см/год	$\Delta t$ , г.	$t_{\text{рас}}$ , лет	$\epsilon$
0,070	0,1239	3,459	0,0191
0,079	0,1206	3,072	0,0212
0,083	0,1088	2,920	0,0200
0,087	0,1096	2,789	0,0212
0,091	0,0934	2,661	0,0192
0,100	0,0871	2,422	0,0192
0,109	0,0708	2,218	0,0173
0,113	0,0706	2,140	0,0178
0,117	0,0718	2,069	0,0186
0,121	0,0772	2,004	0,0204
0,130	0,0715	1,865	0,0203

**ВИВОДИ.** В роботі пропонується новий алгоритм рішення задачі довговечності корозійуючих конструкцій, що використовує лінгвістичну змінну для опису агресивної середовища. Нечітка інформація про параметри середовища формалізована за допомогою апарату теорії нечітких множин. Пропонується швидкість корозії задавати шестью рівнями з гладкою функцією належності. Для визначення параметрів численного інтегрування пропонується використовувати нейронну мережу, що дозволило отримати рішення задачі довговечності з заданою точністю.

Використання НС для визначення параметрів численних процедур дає підставу кваліфікувати створену інформаційну систему як інтелектуальну, призначену для рішення задач довговечності корозійуючих конструкцій.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И.Г., Почтман Ю.М. Расчет и рациональное проектирование конструкций, подвергающихся коррозионному износу (обзор) // Физико-химическая механика материалов. – 1991. – № 2. – С. 7–15.
2. Зеленцов Д.Г., Филатов Г.В. Обзор исследований по применению методов нелинейного математического программирования к оптимальному проектированию конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой // Вопросы химии и химической технологии. – 2002. – № 4. – С. 108–115.
3. Зеленцов Д.Г. Расчет конструкций с изменяющейся геометрией в агрессивных средах. Стержневые системы. – Днепропетровск: УГХТУ, 2002. – 168 с.
4. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику / <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book2/index.php>.

REFERENCES

1. Ovchinnikov I.G. Calculation and rational design of the designs, exposed to corrosion wear (review) // The physical and chemical mechanics of materials. – 1991. – № 2. – P. 7–15 [in Russian].
2. Zelentsov D.G., Filatov G. V. The review of researches on application of methods of nonlinear mathematical programming to optimum design of the designs cooperating with an excited environment // Questions of chemistry and chemical technologists. – 2002. – № 4. – P. 108–115 [in Russian].
3. Zelentsov D.G. Calculation of designs with a changing geometry in excited environments. Rod systems. – Dnipropetrovsk: The Ukrainian state chemical process university, 2002. – 168 p. [in Russian].
4. Shtovba S. D. Introduction in the theory of indistinct sets and indistinct logic / <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book2/index.php> [internet recourse].

Стаття надійшла 10.02.2011.

Рекомендована до друку к.фіз.-мат.н., доц. Ляшенко В.П.