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

2019, №3, Том 6 / 2019, No 3, Vol 6 <https://t-s.today/issue-3-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/22SATS319.pdf>

DOI: 10.15862/22SATS319 (<http://dx.doi.org/10.15862/22SATS319>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Черных В.К. Моделирование коррозионно-механического поведения многоэлементных металлических конструкций транспортных сооружений в реальных условиях эксплуатации // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №3, <https://t-s.today/PDF/22SATS319.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/22SATS319

For citation:

Chernykh V.K. (2019). Modeling of corrosion-mechanical behavior of multi-element metal structures of transport works in real-world conditions. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/22SATS319.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/22SATS319

УДК 539.3, 624.04

ГРНТИ 67.11.35

Черных Валентин Константинович

ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения»

Филиал в г. Саратове, Саратов, Россия

Старший преподаватель

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», Пенза, Россия

Кафедра «Строительные конструкции»

Старший преподаватель

E-mail: mtt91@yandex.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=773354

Моделирование коррозионно-механического поведения многоэлементных металлических конструкций транспортных сооружений в реальных условиях эксплуатации

Аннотация. Статья является частью диссертационного исследования автора. Многоэлементные металлические конструкции широко применяются в конструкциях транспортных сооружений (металлические пролетные строения, фермы железнодорожных мостов, путепроводов и др.). Во время эксплуатации такие конструкции подвергаются совместному действию нагрузок, температур и агрессивных сред. В соответствии с этим представляется актуальной задача прогнозирования поведения таких конструкций. Она заключается в разработке эффективных моделей, ориентированных на расчет несущей способности элементов конструкций, подвергающихся коррозионному износу.

В статье рассмотрены наиболее распространенные коррозионные повреждения металлических многоэлементных конструкций транспортных сооружений, классификация коррозионных процессов по характеру разрушения поверхности, основные типы металлических элементов и конструкций мостов. Определены основные параметры, характеризующие коррозионный износ металлоконструкций. Рассмотрены способы учета воздействия агрессивной среды на металлические конструкции, т. е. известные математические модели и работы, в которых уделено внимание проблеме моделирования коррозионного износа. Описан процесс идентификации моделей коррозионного износа (определения неизвестных

коэффициентов модели). Приведена система уравнений для определения коэффициентов математической модели коррозионного износа.

Приведены значения коэффициентов моделей, использующихся для прогнозирования поведения конструкций, при различном выборе промежуточной точки. Рассмотрена статически неопределимая плоская пятиэлементная ферма произвольного поперечного сечения, часть стержней которой работает на растяжение, а часть – на сжатие. Для данной конструкции решается задача оценки долговечности. Для решения данной задачи используется исправленный метод Эйлера. Приведены полученные численные значения долговечности ферм из пяти стержней в зависимости от длин стержней.

Ключевые слова: коррозия; агрессивная среда; металлические конструкции; многоэлементные конструкции; коррозионный износ; пролетное строение; напряженно-деформированное состояние; метод конечных элементов; ферма; стержневые конструкции

Введение

Коррозионное разрушение металлических конструкций транспортных сооружений в процессе эксплуатации является одной из наиболее актуальных проблем. По данным NACE («National Association of Corrosion Engineers» – Международная ассоциация инженеров-коррозионистов), в США ущерб от коррозии, а также затраты на борьбу с ней составили 3,1 % от ВВП (276 млрд долларов). В Германии этот ущерб составил 2,8 % от ВВП. По оценкам специалистов различных стран, потери от коррозии в развитых странах составляют от 2 до 4 % валового национального продукта [1].

Механизмы коррозии, в зависимости от вида сред, могут быть разные, но с феноменологической точки зрения, все они приводят к двум видам воздействия:

- изменение геометрии конструкции (размеры и формы);
- изменение механических характеристик материала.

Состояние проблемы

В связи с огромными размерами нашей страны, необходимо учитывать то, что конструкции мостов и других транспортных сооружений эксплуатируются в различных климатических регионах. На мосты и сооружения в процессе эксплуатации оказывают воздействие статические и динамические нагрузки [2; 3].

Коррозионные процессы в металлоконструкциях мостовых сооружений можно классифицировать по характеру разрушения поверхности на сплошную коррозию (равномерное воздействие), местную (локальные повреждения) и язвенную [3].

Одним из самых простых и распространенных пролетных строений является балочное. Оно применяется как в автодорожных, так и в железнодорожных мостах:

Рисунок 1. Коррозия верхнего пояса балки пролетного строения автодорожного моста через р. Белую в г. Уфе (фотография автора)

Рисунок 2. Коррозия конструкций пролетного строения моста через р. Белую в г. Уфе (фотография автора)

Для перекрытия пролетов в железнодорожных мостах, широкое применение нашли пролетные строения с решетчатыми фермами. Данные пролетные строения наиболее распространены в отечественном мостостроении.

На рис. 3 следы коррозии присутствуют на боковых поверхностях мостового сооружения:

Рисунок 3. Коррозионное повреждение ферменного пролетного строения моста через реку Урал (источник <http://gallery.ru>)

Узлы мостовых ферм (рис. 4) являются наиболее уязвимыми в фермах мостов:

Рисунок 4. Коррозия в узле фермы
железнодорожного моста (источник <https://izyskaniya-obsledovanie.ru>)

Также стоит отметить такое повреждение, как нарушение целостности антикоррозионного покрытия, как в процессе длительной эксплуатации (рис. 5), так и при их устройстве:

Рисунок 5. Нарушение целостности
антикоррозионного покрытия (источник <https://jp.depositphotos.com>)

К настоящему времени поведение металлических конструкций исследовано достаточно полно. В то же время количество работ, посвященных изучению поведения таких конструкций в условиях коррозионного износа, весьма мало.

Исследования поведения многоэлементных стержневых конструкций при действии механических и тепловых нагрузок приведены в работах отечественных и зарубежных ученых: Ф.Ф. Ажогина, Г.В. Акимова, Ю.И. Арчакова, Л.А. Гликмана, Э.М. Гутмана, Г.В. Карпенко, В.П. Королева, В.В. Петрова, И.Г. Овчинникова, В.В. Романова и др. Многие результаты составляют основу многочисленной литературы [4–9].

Постановка проблемы. Методы решения

Необходимо уделять внимание учету условий эксплуатации еще на стадии проектирования. В связи с этим, представляется актуальной проблема разработки эффективных моделей, ориентированных на расчет несущей способности элементов конструкций,

подвергающихся коррозионному износу. По результатам экспериментальных данных находятся коэффициенты модели (выполняется их идентификация).

Процесс коррозионного взаимодействия рассматривается как последовательная смена состояний конструкции в некотором заданном интервале времени. В большинстве случаев, математическая модель представляется в виде системы алгебраических, дифференциальных, интегральных уравнений, связывающих характеристики протекания процесса с внешними воздействиями.

В качестве параметров, характеризующих коррозионный процесс, могут быть приняты следующие [10–13]:

- глубина коррозионного поражения δ ;
- потеря массы материала M ;
- изменение площади поперечного сечения F ;
- изменение прочностной характеристики R .

В статье в качестве параметра износа будет рассматриваться глубина коррозионного поражения.

Математические модели, описывающие процесс накопления повреждений при коррозионном износе в некоторых агрессивных средах:

Таблица 1

Известные модели коррозионного износа

Авторы модели	Вид		Источник
А. Лиддар, Б. Виттакер	$\delta = k \lg(\alpha + t)$	(1)	[14]
П. Азиз, Ж. Меткалф	$\delta = k[1 - \exp(\alpha t)]$	(2)	[15]
Я.П. Штурман	$\delta = \frac{b t}{t + R}$	(3)	[13]
В.И. Никитин	$\frac{d\delta}{dt} = \alpha \exp(-\beta t)$	(4)	[16]
А.Ф. Малыгин	$\frac{d\delta}{dt} = k\delta$	(5)	[17]
В.В. Петров, И.Г. Овчинников	$\frac{d\delta}{dt} = k\delta(b - \delta)$	(6)	[18]

Разработано автором

В этих моделях в качестве параметра, описывающего коррозионный износ, принимается глубина коррозионного поражения δ . Приведенные модели не учитывают влияния напряженно-деформированного состояния на скорость протекания коррозионного процесса. Однако во многих случаях это влияние оказывается значительным, и учитывать его необходимо.

Рассмотрим модель И.Г. Овчинникова:

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0 \left[1 + k_1 \sigma_{eq} + k_2 \sigma_{eq}^2 \right], \quad (1)$$

где σ_{eq} – некоторое эквивалентное напряжение, выбранное таким образом, чтобы коррозионный процесс в условиях сложного напряженного состояния протекал с той же скоростью, что и при одноосном растяжении или сжатии [19].

Имеются два неизвестных коэффициента: k_1 и k_2 . Система уравнений для определения коэффициентов k_1 и k_2 имеет вид:

$$\begin{cases} \exp\left(\frac{V\sigma}{TR}\right) = 1 + k_1\sigma + k_2\sigma^2 \\ \exp\left(\frac{V[\sigma]}{TR}\right) = 1 + k_1[\sigma] + k_2[\sigma]^2 \end{cases} \quad (2)$$

Решая полученную систему, получим значения коэффициентов k_1 и k_2 модели (1). Очевидно, значения k_1 и k_2 будут зависеть от выбора промежуточной точки σ на заданном интервале.

Некоторые полученные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2
Значения коэффициентов модели при различном выборе промежуточной точки

σ , МПа	$k_1 \times 10^{-2}$, МПа ⁻¹	$k_2 \times 10^{-6}$, МПа ⁻²	ε
80,0	2,711	5,34	0,0041839
90,0	2,699	5,39	0,0035001
100,0	2,687	5,44	0,0030817
110,0	2,675	5,49	0,0029402
120,0	2,663	5,54	0,0030874
130,0	2,651	5,59	0,0035356
140,0	2,638	5,64	0,0042976
150,0	2,625	5,69	0,0053866

Источник [19]

Полученные модели используются для прогнозирования поведения конструкций, причем эти конструкции могут быть рассчитаны либо известными способами строительной механики, либо с применением программного комплекса, основанном на методе конечных элементов (МКЭ).

Результаты. Анализ

Рассмотрим ферму, нагруженную произвольной системой нагрузок, с произвольными граничными условиями, состоящую из N стержней произвольного поперечного сечения, часть которых работает на растяжение, часть – на сжатие. Конструкция эксплуатируется в агрессивной среде, вызывающей коррозионный износ. Долговечность конструкции определяется моментом выхода из строя какого-либо ее элемента, то есть условиями вида:

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

Здесь $\sigma_i(t)$ – напряжение в i -м элементе; $[\sigma]$ – предельно допустимое значение напряжения; $\sigma_j^*(t)$ – критическое напряжение потери устойчивости; J – множество стержней, работающих на сжатие.

Для описания характера влияния агрессивной среды будем для определенности использовать модель:

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0 [1 + k \sigma_{eq}] \quad (4)$$

Рисунок 6. Статически неопределимая ферма (рисунок автора)

По формулам для стержня круглого сечения или для стержня произвольного сечения вычислялось точное значение долговечности отдельного стержня, нагруженного растягивающей нагрузкой P . Затем задача оценки долговечности для этого же стержня несколько раз решалась численно. При этом последовательно уменьшалась величина шага интегрирования Δt и определялась погрешность численного решения. На основании анализа полученных результатов определялось значение шага по времени Δt , при котором погрешность численного решения не превышала 0,1 %. Очевидно, что значение долговечности конструкции, определенное численно с использованием полученного значения Δt , не будет отличаться от истинного более чем на 0,1 %, и может считаться эталонным.

Численный эксперимент проводился для $E = 2,1 \times 10^5 \text{ МПа}$; $v_0 = 0,1 \text{ см/год}$; $k = 0,005 \text{ МПа}^{-1}$. Для получения эталонного решения использовался шаг по времени $\Delta t = 0,025 \text{ года}$. Величина приложенной нагрузки: $P = 5000 \text{ кг}$. Нагрузка подбиралась таким образом, чтобы начальные напряжения в максимально нагруженных элементах фермы отличались незначительно.

В таблице 3 приведены численные значения долговечности ферм из пяти стержней в зависимости от длин стержней. При этом растянутые стержни имели круглое сечение, сжатые – круглое, кольцевое и двутавровое (элементы (3) и (5)). Размеры фасонных профилей выбирались из условия равенства их площади сечения площади круглого сечения. Таким образом обеспечивалось приблизительно равенство начальных напряжений в соответствующих элементах конструкции.

Таблица 3

Долговечность статически неопределимой фермы

	t , лет				
	5,782	4,377	3,066	1,835	0,672
Круг $R = 1,93 \text{ см}$	4,224	4,224	4,224	4,175	4,047
Труба № 70×6	1,808	1,808	1,808	1,808	1,497
Двутавр № 10					
l , см	75,0	100,0	125,0	150,0	175,0

Долговечность фермы, все элементы которой имели круглое сечение, определялась долговечностью элемента (5), активными ограничениями являлись ограничения по устойчивости. Поэтому при относительно малой длине стержней начальное значение критического напряжения было достаточно высоким, что наряду с низкой скоростью роста

напряжений в элементах обусловило высокое значение долговечности. Увеличение длин стержней привело к резкому уменьшению критического напряжения, и, следовательно, и долговечности.

Заключение

Коррозионный износ приводит к сокращению сроков службы конструкции. Если в обычных условиях, конструкция может эксплуатироваться достаточно длительный период времени, то с учетом воздействия агрессивных сред, эти сроки значительно уменьшаются.

В статье поставлена проблема разработки эффективных моделей, ориентированных на моделирование поведения элементов металлоконструкций транспортных сооружений, подвергающихся коррозионному износу. Предложены математические модели коррозионного износа, рассмотрены вопросы долговечности и оптимального проектирования нагруженных конструкций с учетом происходящих в них коррозионных процессов.

В качестве объекта исследования рассматривалась статически неопределимая ферма, подверженная воздействию сильноагрессивной среды. Практическое совпадение полученных результатов и несоизмеримые при этом вычислительные затраты подтверждают эффективность разработанных алгоритмов, основанных на использовании аналитических формул, даже при рассмотрении достаточно сложных случаев коррозионного воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зырянова Ю.Б. К вопросу о финансово-экономическом обосновании оценки коррозионных потерь в нефтехимической отрасли // Проблемы современной экономики: материалы IV Междунар. науч. конф. (г. Челябинск, февраль 2015 г.). – Челябинск: Два комсомольца, 2015. – С. 33–36.
2. Овчинников И.И., Миронов М.Ю., Овчинников И.Г., Снегирев Г.В., Черных В.К., Моисеев О.Ю. Обеспечение сохранности малых и средних мостов с металлическими пролетными строениями // Интернет-журнал «Науковедение», 2013 №5 (18) [Электронный ресурс] – М.: Науковедение, 2013.
3. Защита от коррозии металлических и железобетонных мостовых конструкций методом окрашивания / И.Г. Овчинников, А.И. Ликверман, О.Н. Распоров и др. – Саратов: Изд-во «Кубик», 2014. – 504 с.
4. Арчаков Ю.И. Водородная коррозия стали. – М.: Металлургия, 1985. – 112 с.
5. Бережной К.П. Влияние коррозии на надежность стальных строительных конструкций при низких температурах // Индустриальные технические решения для реконструкции зданий и сооружений: Тезисы докл. Всесоюзн. семинара. – Макеевка, 1986. – с. 49–51.
6. Стеклов О.И. Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
7. Овчинников И.Г., Хадеев В.М. Расчет конструкций, подверженных коррозионному износу (учебное пособие). Иваново, 1991, (ИИСИ, СПИ). 102 с.
8. Овчинников И.Г., Айнабеков А.И., Кудайбергенов Н.Б. Инженерные методы расчета конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах (учебное пособие). Изд-во КазХТИ, Шымкент, 1994. 131 с.

9. Петров В.В., Овчинников И.Г., Шихов Ю.М. Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой. – Саратов: СГУ, 1987. – 288 с.
10. Ажогин Ф.Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей. – М.: Металлургия, 1974. – 98 с.
11. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. – М.: Металлургия. – 1981. – 281 с.
12. Перекрестов В.А., Овчинников И.Г. К оценке длительной прочности и пластичности материалов в радиационных условиях. – Саратов: СПИ, 1983. – 22 с. – Деп. в ВИНТИ 08.04.83. – № 21. 97–83.
13. Цикерман Л.Я., Штурман Я.Г. Прогноз опасности грунтовой коррозии для стальных сооружений // Защита металлов. – 1967. – № 2. – с. 243–244.
14. Liddart A.G., Whittaker B.A. Journal of the Institute of Metals. – 1961. – Vol. 4. – № 2. – P. 73–88.
15. Цикерман Л.Я. Диагностика коррозии трубопроводов с применением ЭВМ. – М.: Недра, 1977. – 319 с.
16. Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Идентификация и верификация моделей коррозионных и деформационных процессов. Саратов: СГТУ, 2014. 164 с.
17. Малыгин А.Ф., Гуц А.В., Янковский Ю.В., Ющенков Е.Е. Оценка высокотемпературной солевой коррозии теплоустойчивой стали и жаропрочных никелевых сплавов // Физико-химическая механика материалов. – 1982. – № 6. – с. 92–95.
18. Овчинников И.Г., Петров В.В. Определение долговечности элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой // Строит. механика и расчет сооружений. – 1982. – № 2. – с. 8–10.
19. Зеленцов Д.Г. Расчет конструкций с изменяющейся геометрией в агрессивных средах. Стержневые системы / Д.Г. Зеленцов. – Днепропетровск: УГХТУ, 2006. – 168 с.

Chernykh Valentin Konstantinovich

Samara state transport university
Saratov branch, Saratov, Russia
Penza state university of architecture and construction, Penza, Russia
E-mail: mtt91@yandex.ru

Modeling of corrosion-mechanical behavior of multi-element metal structures of transport works in real-world conditions

Abstract. The article is part of the author's dissertation research. Multi-element metal structures are widely used in the construction of transport structures (metal spans, trusses of railway bridges, overpasses, etc.). During operation, such structures are subjected to the joint effect of loads, temperatures, and corrosive media. In accordance with this, the task of predicting the behavior of such structures seems to be relevant. It consists in the development of effective models oriented to the calculation of the bearing capacity of structural elements subjected to corrosive wear.

The article discusses the most common corrosion damage to metal multi-element structures of transport facilities, the classification of corrosion processes according to the nature of the surface destruction, the main types of metal elements and bridge structures. The main parameters characterizing the corrosive wear of metal structures were determined. Ways to account for the effect of aggressive environment on metal structures, i.e. well-known mathematical models and work, in which attention is paid to the problem of corrosion, wear modeling. The process of identifying corrosion wear models (determining unknown model coefficients) is described. The system of equations for determining the coefficients of a mathematical model of corrosive wear is given.

The values of the coefficients of the models used to predict the behavior of structures, with a different choice of an intermediate point are given. A statically indefinable flat five-element truss of arbitrary cross section, part of the rods of which works in tension and part in compression is considered. For this design solves the problem of assessing durability. To solve this problem, use the corrected Euler method. The obtained numerical values of the durability of trusses of five rods, depending on the lengths of the rods.

Keywords: corrosion; aggressive media; metal constructions; multi-element design; corrosive wear; superstructure; stress-strain state; finite element method; farm; stem design

REFERENCES

1. Zyryanova Yu.B. (2015). K voprosu o finansovo-ehkonomicheskom obosnovanii otsenki korrozionnykh poter' v neftekhimicheskoy otrasli. [*On the issue of financial and economic substantiation of the assessment of corrosion losses in the petrochemical industry.*] Chelyabinsk: Two Komsomol members, pp. 33–36.
2. Ovchinnikov I.I., Mironov M.Yu., Ovchinnikov I.G., Snegirev G.V., Chernykh V.K., Moiseev O.Yu. (2013). Preservation of small and medium-sized bridges with tubular metal spans. *Naukovedenie*, [online] 5(5). Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/112tvn513.pdf> (in Russian).
3. Ovchinnikov I.G., Likverman A.I., Rasporov O.N. (2014). Zashchita ot korrozii metallicheskih i zhelezobetonnykh mostovykh konstruktsiy metodom okrashivaniya. [*Corrosion protection of metal and reinforced concrete bridge structures by painting.*] Saratov: Publishing House "Cube", pp. 504.
4. Archakov Yu.I. (1985). Vodorodnaya korroziya stali. [*Hydrogen corrosion of steel.*] Moscow: Metallurgy, pp. 112.

5. Berezhnoy K.P. (1986). Vliyanie korrozii na nadezhnost' stal'nykh stroitel'nykh konstruktsiy pri nizkikh temperaturakh. [*The effect of corrosion on the reliability of steel building structures at low temperatures.*] Makeevka, pp. 49–51.
6. Steklov O.I. (1990). Stoykost' materialov i konstruktsiy k korrozii pod napryazheniem. [*Resistance of materials and structures to corrosion under stress.*] Moscow: Engineering, pp. 384.
7. Ovchinnikov I.G., Khadeev V.M. (1991). Raschet konstruktsiy, podverzhennykh korroziionnomu iznosu (uchebnoe posobie). [*Calculation of structures subject to corrosion wear (training manual).*] Ivanovo: Ivanovo Civil Engineering Institute, pp. 102.
8. Ovchinnikov I.G., Aynabekov A.I., Kudaybergenov N.B. (1994). Inzhenernye metody rascheta konstruktsiy, ehkspluatiruyushchikhsya v agressivnykh sredakh (uchebnoe posobie). [*Engineering methods for the calculation of structures operating in aggressive environments (study guide).*] Shymkent: Publishing House Kazakh Institute of Chemical Technology, p. 131.
9. Petrov V.V., Ovchinnikov I.G., Shikhov Yu.M. (1987). Raschet ehlementov konstruktsiy, vzaimodeystvuyushchikh s agressivnoy sredoy. [*Calculation of structural elements interacting with an aggressive environment.*] Saratov: Saratov State University, p. 288.
10. Azhogin F.F. (1974). Korroziionnoe rastreskivanie i zashchita vysokoprochnykh staley. [*Corrosion cracking and protection of high strength steels.*] Moscow: Metallurgy, p. 98.
11. Gutman Eh.M. (1981). Mekhanokhimiya metallov i zashchita ot korrozii. [*Mechanochemistry of metals and corrosion protection.*] Moscow: Metallurgy, p. 281.
12. Perekrestov V.A., Ovchinnikov I.G. (1983). K otsenke dlitel'noy prochnosti i plastichnosti materialov v radiatsionnykh usloviyakh. [*On the assessment of the long-term strength and ductility of materials in radiation conditions.*] Saratov: Saratov Polytechnic Institute, p. 22.
13. Tsikerman L.Ya., Shturman Ya.G. (1967). Ground corrosion hazard forecast for steel structures. *Metal Protection*, 2, pp. 243–244 (in Russian).
14. Liddart A.G., Whittaker B.A. (1961). *Journal of the Institute of Metals*, 2(4), pp. 73–88.
15. Tsikerman L.Ya. (1977). Diagnostika korrozii truboprovodov s primeneniem EhVM. [*Diagnostics of pipeline corrosion using computers.*] Moscow: Nedra, 319.
16. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. (2014). Identifikatsiya i verifikatsiya modeley korroziionnykh i deformatsionnykh protsessov. [*Identification and verification of models of corrosion and deformation processes.*] Saratov: Saratov State Technical University, 164.
17. Malygin A.F., Guts A.V., Yankovskiy Yu.V., Yushchenkov E.E. (1982). Evaluation of high-temperature salt corrosion of heat-resistant steel and heat-resistant nickel alloys. *Physicochemical Mechanics of Materials*, 6, pp. 92–95 (in Russian).
18. Ovchinnikov I.G., Petrov V.V. (1982). Determination of the durability of structural elements interacting with an aggressive environment. *Builds. mechanics and calculation of structures*, 2, pp. 8–10 (in Russian).
19. Zelentsov D.G. (2006). Raschet konstruktsiy s izmenyayushcheysya geometriey v agressivnykh sredakh. Sterzhnevye sistemy. [*Calculation of structures with variable geometry in aggressive environments. Rod systems.*] Dnepropetrovsk: Ukrainian State University of Chemical Technology, 168.