

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

**ДЕНИСЮК ОЛЬГА РОСТИСЛАВІВНА**

УДК 004.942:519.853

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ КЕРОВАНОГО ЗА ТОЧНІСТЮ ЧИСЕЛЬНОГО  
АНАЛІЗУ КОРОДУЮЧИХ ШАРНІРНО-СТЕРЖНЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Державному вищому навчальному закладі «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Зеленцов Дмитро Гегемонович,**  
Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет»,  
завідувач кафедри інформаційних систем

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Ляшенко Віктор Павлович,**  
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,  
завідувач кафедри інформатики та вищої математики

доктор технічних наук, професор  
**Стрельнікова Олена Олександрівна,**  
Інститут проблем машинобудування імені А. М. Підгорного НАН України,  
провідний науковий співробітник

Захист відбудеться «29» березня 2017 року о 15:15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.09 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна МОН України за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, ауд. 6-52.

З дисертацією можна ознайомитися в центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 року

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 64.051.09

О. Г. Толстолузька

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У багатьох галузях промисловості, зокрема, у хімічній і металургійній, технологічні процеси відбуваються в агресивних відносно конструкційних матеріалів робочих середовищах. Наслідком впливу таких середовищ на елементи конструкцій є корозійне зношування, тобто руйнування поверхневих шарів металу, що призводить до погіршення робочих характеристик металоконструкцій: зменшення геометричних розмірів їх елементів та зниження несучої здатності. Ігнорування впливу агресивного середовища на етапі проектування може призвести до передчасного виходу конструкцій із ладу і пов'язаних із цим значних економічних та екологічних втрат.

До основних видів втрат від корозії, поряд із вартістю зруйнованого металу і втратами від передчасного виходу конструкцій із ладу, входять втрати, викликані нерациональними конструкторськими рішеннями. Причиною цього є брак надійних, точних та ефективних методик раціонального проектування конструкцій, призначених для експлуатації в агресивному середовищі.

У більшості існуючих праць оптимізація кородуючих шарнірно-стержневих конструкцій (ШСК) здійснювалася на неперервній множині варійованих параметрів, що ускладнювало безпосереднє використання їх в техніці. Реальність полягає в тому, що ШСК звичайно виготовляються з прокатних профілів, розміри перерізів яких регламентовано стандартами. Виходячи з цього, насправді варійованими параметрами мають бути не розміри перерізів елементів ШСК, а типи та типорозміри профілів. Для успішного розв'язання оптимізаційної задачі в цьому випадку необхідна уточнена модель процесу корозійного деформування ШСК та нові методи керованого за точністю чисельного аналізу їх поведінки.

Хоча оптимізація на основі дискретних математичних моделей у ситуаціях, коли не зводиться до «майже еквівалентної» неперервної оптимізації, зазвичай складніша для розробки робастних обчислювальних методів, сучасні приклади в інших галузях демонструють перспективність її практичної реалізації із застосуванням методів еволюційного моделювання, зокрема, генетичних алгоритмів. Провідну роль відіграє точність розв'язку задачі, під якою в даному разі мається на увазі точність обчислення функції обмежень. Для врахування цього аспекту новим і перспективним є залучення до моделювального комплексу нейромережевого модуля керування похибкою, використання якого для регулювання точності обчислень у поєднанні з методом ковзного допуску (МКД) дозволяє істотно підвищити ефективність алгоритму.

Таким чином, нова науково-прикладна задача розробки моделей та методів керованого за точністю чисельного аналізу кородуючих ШСК, результатом вирішення якої є підвищення якості конструкторських рішень, є актуальною й очікуваною у підприємствах хімічної та металургійної промисловості.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано в Державному вищому навчальному закладі «Український державний хіміко-технологічний університет» відповідно до тематики науково-

дослідної роботи кафедри інформаційних систем – держбюджетна тема: «Інтелектуальні інформаційні системи моделювання, аналізу та оптимального проектування складних систем» (№0114U002803).

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи полягає в підвищенні якості та достовірності конструкторських рішень при проектуванні кородуючих ШСК шляхом забезпечення точності обчислення складних функцій обмежень при прийнятних обчислювальних витратах.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких основних задач:

1. Проведення аналізу предметної області з метою визначення проблемних аспектів при моделюванні процесу корозійного деформування ШСК, зокрема проблем точності чисельного аналізу.

2. Розроблення концептуальної моделі розв'язання задач визначення оптимальних параметрів ШСК за критерієм металомісткості з урахуванням фізико-хімічних процесів у них.

3. Удосконалення моделі корозійного деформування ШСК шляхом розробки нових моделей кородуючих перерізів.

4. Розроблення нового методу керування похибкою обчислень функцій обмежень на основі штучних нейронних мереж.

5. Розроблення методу розв'язання задач дискретної оптимізації кородуючих ШСК з обмеженнями з використанням генетичних алгоритмів і методу ковзного допуску.

6. Впровадження наукових результатів дисертаційної роботи.

*Об'єкт дослідження:* процес корозійного деформування ШСК в агресивних середовищах, що породжує ризик руйнування цих конструкцій до закінчення терміну експлуатації.

*Предмет дослідження:* математичні моделі процесу корозійного деформування та створені на їх основі обчислювальні методи керованого за точністю аналізу поведінки ШСК і зниження їх металомісткості.

*Методи дослідження:* для розв'язання поставлених задач було застосовано математичні методи аналізу процесів. Для розв'язання задач оптимізації застосовано метод штрафних функцій, генетичний алгоритм, метод ковзного допуску. Для керування похибкою обчислення функцій обмежень використано штучні нейронні мережі (ШНМ). Обчислення запасу несучої здатності зроблено за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ).

**Наукова новизна одержаних результатів.** У рамках вирішення науково-прикладної задачі розробки моделей та методів керованого за точністю чисельного аналізу кородуючих ШСК отримано наступні наукові результати:

1. Уперше розроблено концептуальну модель визначення оптимальних параметрів кородуючих ШСК, яка відрізняється від існуючих тим, що пошук оптимального проекту здійснюється на дискретній множині розв'язків (множині індексів), використовуються удосконалена модель процесу корозійного деформування і новий метод керування похибкою обчислення функції обмежень

оптимізаційної задачі. Дана модель є основою для побудови методу керованого за точністю чисельного аналізу кородуючих ШСК.

2. Уперше розроблено метод керування похибкою обчислення функції обмежень оптимізаційної задачі із застосуванням штучних нейронних мереж, що вперше дозволило визначити параметри обчислювальних процедур у процесі розв'язання задачі на підставі інформації про необхідну точність і параметри досліджуваного об'єкта.

3. Уперше розроблено метод розв'язання оптимізаційної задачі на основі генетичних алгоритмів та методу ковзного допуску для реалізації нової концептуальної моделі, який, на відміну від існуючих, дозволяє змінювати в процесі розв'язання задачі похибку обчислення функцій обмежень, що зменшує обчислювальні витрати при одночасному забезпеченні заданої точності.

4. Удосконалено модель корозійного деформування ШСК шляхом створення нових моделей кородуючих перерізів стержневих елементів, що вперше дозволило дослідити процес зміни напружень в елементах реальних конструкцій.

**Практичне значення отриманих результатів.** Усі основні наукові результати знайшли впровадження при моделюванні корозійного деформування та визначенні оптимальних параметрів шарнірно-стержневих конструкцій, що експлуатуються в умовах агресивних середовищ.

В ТОВ «Дніпровська холдингова компанія» використання удосконаленої моделі корозійного деформування дозволило при проведенні експертних оцінок залишкової несучої здатності та розробці нових конструкторських проектів металоконструкцій промислових будівель з урахуванням впливу агресивних середовищ уточнити прогностичні оцінки запасу несучої здатності металоконструкцій, обґрунтовано визначити термін та склад ремонтно-монтажних робіт. При розробці нових конструкторських проектів використання оптимізаційного алгоритму дало можливість обґрунтовано призначити параметри металоконструкцій на основі критеріїв металомісткості та довговічності (акт впровадження від 01.09.2016).

Розроблену автором удосконалену математичну модель корозійного деформування ШСК та алгоритм методу ковзного допуску використано на кафедрі інформаційних систем ДВНЗ «УДХТУ» при виконанні науково-дослідної роботи «Інтелектуальні інформаційні системи моделювання, аналізу та оптимального проектування складних систем» (№0114U002803, довідка від 16.05.2016).

Результати досліджень використано в навчальному процесі ДВНЗ УДХТУ при викладанні дисциплін «Математичне моделювання хіміко-технологічних процесів», «Методи еволюційного моделювання», «Нейронні мережі», «Методи дослідження операцій», а також при виконанні дипломних робіт бакалаврів і магістрів (акт від 06.06.2016).

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні наукові положення і результати дисертаційної роботи одержано автором самостійно. У працях без співавторів [5, 7] автором запропоновано метод керування похибкою розв'язання систем диференціальних рівнянь, що описують процес корозії в елементах металевих конструкцій, із застосуванням штучних нейронних мереж. У роботах, опублікованих

у співавторстві, авторів належать наступні результати. У [1, 6] розроблено нові моделі кородуючих перерізів стержневих елементів. У [2, 8, 9, 11] запропоновано математичне формулювання нової задачі дискретної оптимізації ШСК з урахуванням фізико-хімічних процесів у них, яке передбачає отримання результату із заданою точністю, і використання методу ковзного допуску при розв'язанні даної задачі. У [3, 10] пропонується використання методу керування похибкою обчислення функції обмежень за допомогою штучних нейронних мереж при розв'язанні задач оптимального проектування кородуючих ШСК. У [4] запропоновано засоби підвищення точності розв'язку систем диференціальних рівнянь, що описують корозійний процес.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на наукових семінарах, міжнародних і всеукраїнських конференціях, де отримали позитивну оцінку: Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні ІТММ–2015» (Дніпропетровськ, 2015), I Всеукраїнській науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем КМОСС–2015» (Дніпропетровськ, 2015), VII Всеукраїнській науково-практичній конференції за міжнародною участю «Інформатика та системні науки ІСН–2016» (Полтава, 2016), Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні ІТММ–2016» (Дніпропетровськ, 2016), Міжнародній науково-технічній конференції «Геоінформаційні системи, комп'ютерні технології еколого-економічного моніторингу, ГІСКТЕЕМ–2016» (Дніпропетровськ, 2016). У повному обсязі дисертаційну роботу було представлено на: IV Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях» (Харків, ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2016), міжвузівському науковому семінарі «Математичне моделювання та оптимізація складних систем» (Дніпро, ДВНЗ УДХТУ, 2016).

**Публікації.** Основні результати дисертаційних досліджень опубліковано в 11 наукових працях, серед яких 4 статті в наукових фахових виданнях України з технічних наук, одна стаття в зарубіжному виданні, 2 статті у виданнях, що входять до наукометричних баз «Index Copernicus», «РИНЦ», 6 публікацій у збірниках матеріалів конференцій. Зроблено 6 доповідей на наукових конференціях різного рівня.

**Структура роботи.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і трьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 138 сторінок, із них: 23 таблиці, 32 рисунка, 114 сторінок основного тексту, 124 найменування списку використаних джерел на 15 сторінках і три додатки на трьох сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, визначено необхідність постановки і розв'язання нової задачі дискретної оптимізації кородуючих конструкцій, що передбачає отримання результату із заданою точністю, розробки нових математичних моделей, методик, алгоритмів розв'язання поставленої задачі. Сформульовано мету і задачі дослідження; вказано зв'язок роботи з науковими програмами; наведено дані про наукову новизну, практичне значення та впровадження результатів дослідження, публікації і апробацію роботи, її структуру, обсяг.

У першому розділі зроблено огляд наукових праць із проблем математичного моделювання поведінки, прогнозування довговічності й оптимізації кородуючих конструкцій. Відзначено вагомий внесок у розвиток даного напрямку таких вчених як Ф.Ф. Ажогін, Г.В. Акімов, Ю.І. Арчаков, Б. Віттакер, Г. Грюлінг, Е.М. Гутман, Н. Денисон, А.П. Дзюба, Р. Ділон, В.М. Долинський, Д.Г. Зеленцов, В.Г. Карпунін, І.А. Колесник, В.П. Корольов, А. Ліддар, І.Г. Овчинников, І. Палмер, В.В. Петров, Ю.М. Почтман, В.Д. Райзер, Н.Д. Томашов, Г.В. Філатов, Л.Я. Цикерман, К. Швайцер, Л.Л. Шрайер, Я.П. Штурман та ін. Проведений аналіз свідчить, що, попри широкий розвиток теорії моделювання й оптимального проектування кородуючих ШСК, деякі аспекти даної проблеми все ще далекі від остаточного вирішення:

1. У більшості існуючих праць в якості об'єктів досліджень розглядалися абстрактні конструкційні елементи. Роль варійованих параметрів при розв'язанні оптимізаційних задач при цьому відігравали розміри перерізів стержнів. Роботи, присвячені моделюванню металевих конструкцій з елементами із стержнів стандартних профілів, що передбачає використання дискретної множини варійованих параметрів у задачах оптимізації, практично відсутні.

2. У відомих дослідженнях відсутні моделі кородуючих перерізів стержнів реальних профілів (двотавр, швелер, рівнополичний і нерівнополичний кутник). Створення таких моделей необхідне для побудови адекватної моделі корозійного деформування ШСК.

3. Існуючі нейромережеві алгоритми управління похибкою чисельного розв'язку задачі довговічності кородуючих ШСК не можуть бути застосовані до реальних конструкцій, оскільки не враховують форму перерізу, і потребують подальшого удосконалення.

4. Розв'язання задач оптимізації кородуючих ШСК із заданою точністю та за прийнятний час неможливе з використанням вже існуючих методів. Для цього необхідна їх адаптація та створення нового методу для розв'язання задач даного класу.

У другому розділі запропоновано нову концептуальну модель визначення оптимальних параметрів конструкцій з урахуванням фізико-хімічних процесів у них і проведено аналіз проблем, що виникають при її реалізації.

Постановка задачі оптимального проектування кородуючих ШСК формулюється наступним чином. Потрібно визначити параметри перерізів елементів (тип і розмір перерізу) так, щоб об'єм конструкції був мінімальним, і протягом заданого періоду експлуатації вона зберігала свою несучу здатність, тобто задовольняла обмеженням за міцністю і стійкістю. У вигляді задачі нелінійного математичного програмування запропоновано наступну постановку оптимізаційної задачі:

$$\begin{aligned}
 F(\bar{x}) &= \sum_{i=1}^N L_i A_i(\bar{x}) \rightarrow \min; \bar{x} \in X_D; \\
 X_D &: \{ \bar{x} \in I^n \mid g_1(\bar{x}) = [\sigma] - \sigma_i(\bar{x}, t^*) \geq 0; \\
 g_2(\bar{x}) &= \sigma_j^*(\bar{x}, t^*) - \sigma_j(\bar{x}, t^*) \geq 0; i \in \overline{1, N}; j \in J \},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де  $L_i, A_i$  – довжина та площа перерізу  $i$ -го елементу;  $N$  – кількість елементів конструкції;  $\bar{x}$  – вектор варіюваних параметрів;  $I^n$  –  $n$ -мірна множина індексів;  $\sigma_i$  – поточне напруження в  $i$ -му елементі;  $[\sigma]$  і  $\sigma_j^*$  – граничне значення напруження і критичне напруження втрати стійкості в  $j$ -му елементі;  $J$  – множина елементів, що працюють на стискання;  $t^*$  – заданий час експлуатації конструкції.

У даній роботі пропонується розглядати ШСК, елементи яких виготовлено зі стандартних прокатних профілів: двотавра, швелера, кутників. У цьому разі розміри перерізів, по-перше, можуть змінюватися тільки дискретно, по-друге, не можуть змінюватися незалежно. Тому вектор варіюваних параметрів буде являти собою сукупність індексів, які визначають тип і типорозмір перерізу.

Для розв'язання задач дискретної оптимізації обґрунтовано доцільність використання генетичних алгоритмів. При реалізації ГА використовується інформація тільки про цільову функцію і функції обмежень (ФО), тому їх ефективність об'єктивно нижча, ніж у методів математичного програмування, що використовують похідні цих функцій. Один із підходів до підвищення ефективності ГА полягає в мінімізації обчислювальних витрат при обчисленні ФО.

Обчислення ФО передбачає моделювання процесу корозійного деформування ШСК, тобто процесу зміни в часі деформацій та напружень в її елементах.

Процес корозійного деформування ШСК моделюється шляхом чисельного розв'язання задачі Коші для системи диференціальних рівнянь (СДР) вигляду:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 [1 + k\sigma_i(\bar{\delta})]; \delta_i|_{t=0} = 0; i = \overline{1, N},
 \tag{2}$$

де  $\delta_i$  – глибина корозійного ураження в  $i$ -му елементі;  $v_0$  – швидкість корозії при відсутності напружень,  $k$  – коефіцієнт впливу напруження.

Обчислення функцій напруження потребує розв'язання системи рівнянь механіки, що складається з системи рівнянь рівноваги та сумісності деформацій, співвідношень Коші та закону Гука (для пружних тіл):



$$\begin{aligned}\bar{R} &= K \cdot \bar{u}; \\ \bar{\varepsilon} &= D \cdot \bar{u}; \\ \bar{\sigma} &= E \cdot \bar{\varepsilon},\end{aligned}\tag{3}$$

де  $K$ ,  $D$ ,  $E$  – матриці жорсткості, елементи якої змінюються за часом унаслідок корозії, диференціювання і пружності;  $\bar{R}$ ,  $\bar{u}$ ,  $\bar{\varepsilon}$ ,  $\bar{\sigma}$  – вектори зовнішніх навантажень, вузлових переміщень, деформацій і напружень.

Для розв'язання системи (3) використовується інформація про значення геометричних характеристик елементів у довільний момент часу, для визначення яких необхідні моделі кородуючих перерізів реальних профілів.

Оскільки в загальному випадку для розв'язання системи рівнянь механіки використовуються чисельні методи, наприклад, метод скінченних елементів, то можливе тільки чисельне розв'язання СДР. Параметри чисельного розв'язання СДР є входними параметрами та зазвичай не змінюються в процесі розв'язання задачі. Очевидно, що обчислювальні витрати в багато разів перевищують ті, що потрібні для розв'язання «класичної» задачі оптимізації. Похибка отриманого результату в цьому випадку не піддається прогнозуванню.

Призначення таких параметрів чисельного розв'язку, які з прийнятною імовірністю дозволять визначити довговічність конструкції з допустимою похибкою для всієї множини розв'язків, призведе до надмірних обчислювальних витрат. Для успішного вирішення даної проблеми необхідно визначати параметри чисельного розв'язання СДР на підставі інформації про параметри конструкції (варійовані та постійні), параметри АС і величину допустимої похибки.

На підставі аналізу постановки задачі та методів її розв'язання сформульовано наступні її особливості.

1. Традиційні постановки задач оптимізації кородуючих ШСК передбачали пошук розв'язків на неперервній множині варійованих параметрів, що істотно знижувало їх практичну цінність. При розв'язанні задачі оптимізації в постановці (1) варійованими параметрами є індекси (тип і типорозмір стандартного профілю). Для розв'язання таких задач використання багатьох методів математичного програмування неможливе. Крім того, для моделювання процесу корозійного деформування ШСК потрібні нові моделі кородуючих перерізів.

2. На відміну від відомих постановок задач, передбачається одержання розв'язку з похибкою, що не перевищує заданої величини. Оскільки похибка обчислення функцій обмежень залежить, перш за все, від параметрів чисельного розв'язання СДР, що описує корозійний процес в елементах ШСК, пропонується новий метод розв'язання задачі оптимізації, заснований на використанні методу ковзного допуску (МКД).

Концепція МКД полягає в тому, що допустима похибка є спадною функцією номера ітерації розв'язання оптимізаційної задачі. На початкових ітераціях вона може бути досить великою, унаслідок чого обчислювальні витрати є мінімальними, а в околі екстремуму похибка не перевищує величини, що визначається замовником.

Така стратегія передбачає наявність методу керування похибкою, в якому параметром керування є параметр чисельного розв'язання СДР.

На рис. 1 зображена нова концептуальна модель визначення оптимальних параметрів кородуючих ШСК, побудована з урахуванням особливостей розв'язання даної задачі.

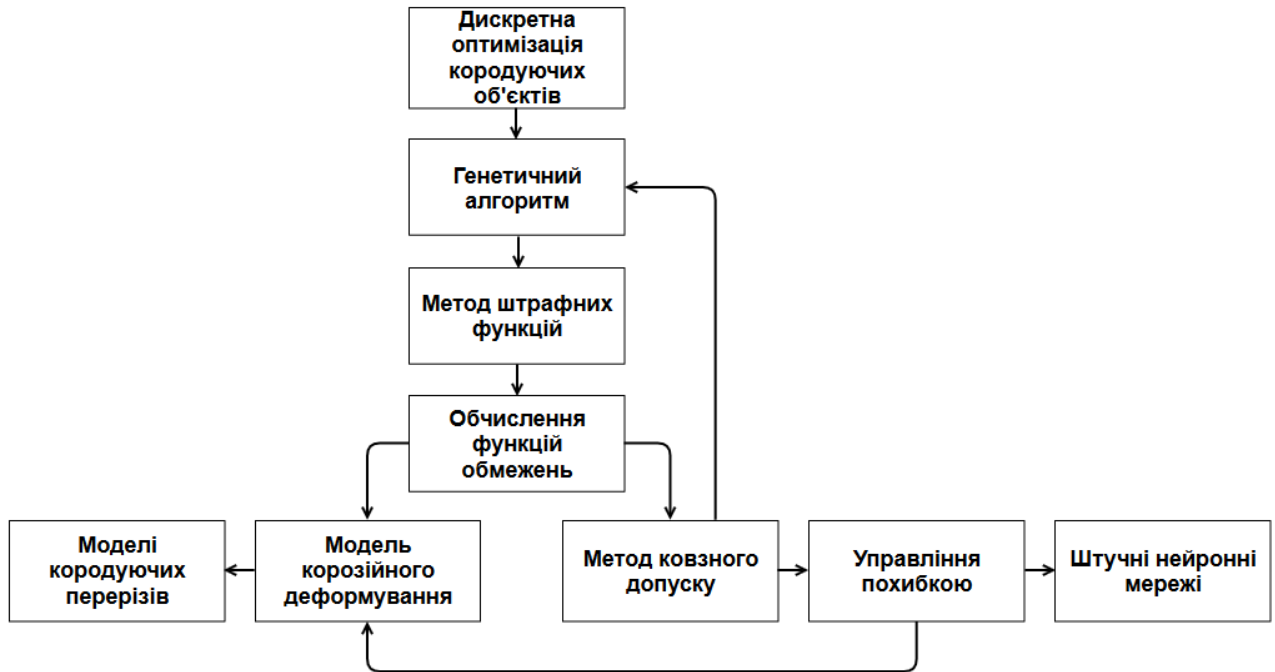


Рис. 1 – Концептуальна модель визначення оптимальних параметрів кородуючих шарнірно-стержневих конструкцій

Таким чином, у другому розділі сформульовано нову задачу дискретної оптимізації кородуючих ШСК на неметричному просторі розв'язків та запропоновано нову концептуальну модель її розв'язання.

Основні матеріали розділу опубліковано в роботах [2, 8, 9, 11].

**У третьому розділі** розглядається вдосконалення моделі корозійного деформування ШСК шляхом розробки нових моделей кородуючих перерізів, що дозволило вперше дослідити процес корозії в реальних конструкціях.

Традиційні постановки задач оптимізації кородуючих ШСК передбачали пошук розв'язків на неперервній множині варійованих параметрів, що істотно знижувало їх практичну цінність, оскільки в реальності ШСК виготовляються з профілів, всі розміри яких регламентовано стандартами і можуть змінюватися лише дискретно. Розглядається постановка задачі оптимізації, в якій варійованими параметрами є індекси (тип і типорозмір стандартного профіля). Для розв'язання таких задач розроблено удосконалену модель корозійного деформування, засновану на використанні нових моделей кородуючих перерізів.

При моделюванні поведінки ШСК, що складаються зі стержнів з реальним перерізами, враховано ряд особливостей:

– унаслідок більшого периметра перерізу стандартного профіля його площа зменшується значно інтенсивніше, ніж, наприклад, у стержні круглого чи кільцевого перерізу, які розглядалися в існуючих роботах;

– у стержнях двотаврового і швелерного профілів можливий третій тип руйнування – повна корозія стояка та, у результаті цього, порушення суцільності перерізу;

– моменти інерції перерізу, необхідні для обчислення критичного напруження втрати стійкості, розраховуються за різними правилами, залежно від форми перерізу;

– у несиметричних профілях необхідно враховувати зміну в часі положення та орієнтації головних осей.

У зв'язку з даними особливостями пропонуються нові моделі кородуючих перерізів, тобто залежності, що визначають зв'язок між значущими характеристиками перерізів (площа, периметр і мінімальний момент інерції), їх початковими розмірами, напруженням, параметрами агресивного середовища та часом.

У дисертаційній роботі пропонується використання моделей кородуючих перерізів, що складаються із сукупності трикутних фрагментів. На рис. 2 зображено параметри реального двотаврового перерізу, на рис. 3 – модель двотаврового перерізу у вигляді сукупності трикутних фрагментів.

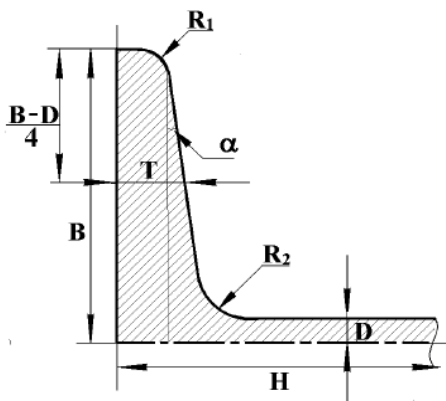


Рис. 2 – Параметри реального двотаврового перерізу

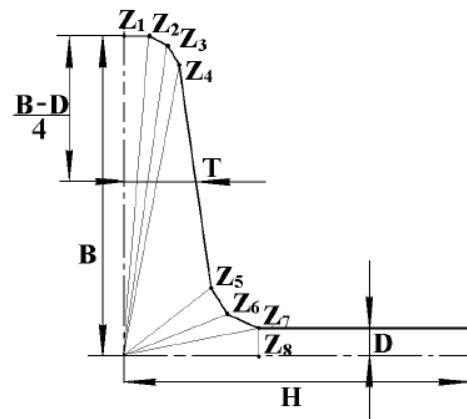


Рис. 3 – Модель перерізу у вигляді сукупності трикутних фрагментів

Процес корозії моделюється шляхом зміни координат точок контуру:

$$\begin{cases} R_1(\delta) = R_1^0 - \delta \\ R_2(\delta) = R_2^0 + \delta \\ Z_i = Z_i(R_1, R_2) \end{cases} \quad (4)$$

Площа і мінімальний момент інерції визначаються додаванням відповідних характеристик трикутних і прямокутного фрагментів, а периметр – додаванням відстаней між точками контура. Адекватність цієї моделі підтверджується збігом характеристик зі значеннями, отриманими аналітично, а також приведеними в нормативних документах (таблиця 1).

Порівняння характеристик реального і модельного двотавру  
в початковий момент часу

№ профіля	$A, \text{см}^2$	$A_m, \text{см}^2$	$\varepsilon_A, \%$	$J, \text{см}^4$	$J_m, \text{см}^4$	$\varepsilon_J, \%$
10	12,0	12,03	0,25	17,9	17,87	0,17
12	14,7	14,76	0,40	27,9	27,85	0,18
14	17,4	17,46	0,34	41,9	42,11	0,50
16	20,2	20,29	0,44	58,6	58,34	0,44

Під час моделювання корозійного деформування ШСК площі перерізів використовуються для обчислення складових матриці жорсткості стержневого елемента, необхідної для розв'язання задачі методу скінченних елементів і визначення напружень в елементах конструкції:

$$K = \frac{EA(t)}{L} \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha & -\cos^2 \alpha & -\cos \alpha \sin \alpha \\ \cos \alpha \sin \alpha & \sin^2 \alpha & -\cos \alpha \sin \alpha & -\sin^2 \alpha \\ -\cos^2 \alpha & -\cos \alpha \sin \alpha & \cos^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha \\ -\cos \alpha \sin \alpha & -\sin^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Момент інерції перерізу, необхідний для обчислення критичного напруження, при якому відбувається втрата стійкості стержня, визначається за формулою Ейлера:

$$\sigma^*(t) = \frac{\pi^2 EJ_{\min}(t)}{L^2 A(t)}. \quad (6)$$

Таким чином, нові моделі кородуючих перерізів дозволяють дослідити процес корозійного деформування елементів ШСК. У розділі вирішено одне з поставлених завдань – побудова вдосконаленої моделі корозійного деформування ШСК на основі нових моделей кородуючих перерізів.

Основні матеріали розділу опубліковано в роботах [1, 6].

**У четвертому розділі** пропонується новий метод керування похибкою розв'язку систем диференціальних рівнянь при обчисленні функцій обмежень.

Вхідні дані, необхідні для обчислення функції обмежень у задачі оптимізації кородуючих конструкцій, представлено у вигляді векторів варійованих параметрів, параметрів конструкції, параметрів АС і параметрів обчислювальних процедур. Якщо вектор параметрів обчислювальних процедур залишається незмінним, то при будь-якій зміні якого-небудь елемента перших трьох векторів похибка обчислення ФО буде змінюватися. Контролювати похибку, а тим більше керувати нею при такому підході неможливо. Необхідно навчитися визначати параметри обчислювальних процедур у процесі розв'язання задачі на основі інформації про параметри конструкції (варійовані і сталі), параметри АС і величину допустимої похибки.

Для розв'язання СДР (2) використовуються однокрокові чисельні методи типу Рунге-Кутти, тому параметром керування є відстань між вузлами часової сітки.

Для побудови апроксимуючої функції автором запропоновано використання штучної нейронної мережі. На рис. 4 зображено архітектуру нейронної мережі для розтягнутих та стиснутих стержнів, обрану за результатами проведених чисельних експериментів. Мережі відрізняються вхідними параметрами.

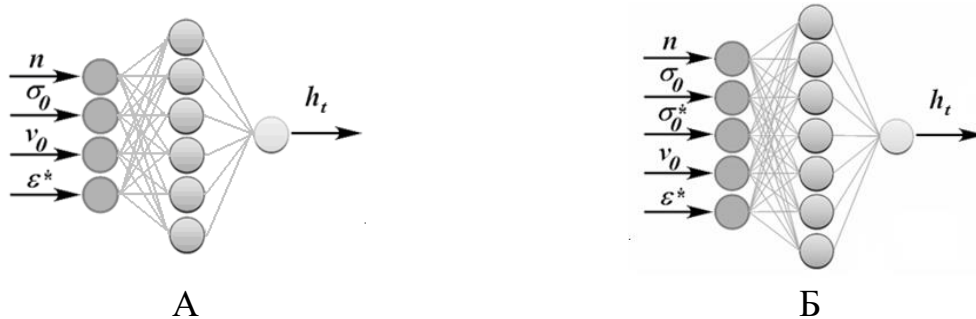


Рис. 4 – Архітектура нейронної мережі для розтягнутого (а) та стиснутого (б) стержнів

Для розтягнутого стержня значущими параметрами є площа і периметр перерізу, початкове напруження та швидкість корозії. Для стиснутого стержня істотний вплив на значення критичного напруження втрати стійкості мають його мінімальний момент інерції і довжина, яка може бути перерахована за величиною початкового критичного напруження втрати стійкості. Форма перерізу є найважливішим параметром, оскільки вона визначає правила обчислення периметра, площі та моменту інерції перерізу. Для кожного типу перерізу навчається своя мережа. Всі розміри фасонних профілів регламентуються стандартами, тому в якості вхідного параметра використовується номер типорозміру профілю  $n$ . Мережі з сигмоїдальними функціями активації прихованого та вихідного шару навчалися за допомогою алгоритму зворотного поширення помилки.

У табл. 2 наведено результати тестування нейромережевого методу керування похибкою. Об'єктом дослідження була 5-стержнева ШСК, зображена на рис. 5. У першому стовпчику таблиці наведено значення допустимої похибки, у другому – відповідні значення параметра чисельного розв'язання СДР, що визначались за допомогою нейронної мережі, у третьому – реальні похибки, у четвертому – кількість вузлів на часовому інтервалі.

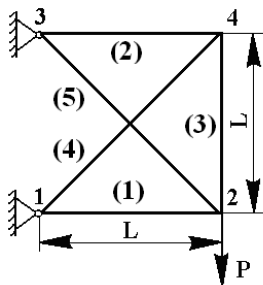


Рис. 5 – Розрахункова схема ШСК

Таблиця 2

Результати тестування

$\varepsilon^*$ , %	$h_t$ , років	$\varepsilon$ , %	$N$
1,0	0,1596	1,015	19
2,0	0,3597	2,036	9
3,0	0,5634	3,078	6
4,0	0,7953	3,742	5
5,0	1,1664	4,852	4

На підставі отриманих результатів зроблено наступні висновки:

1. Метод керування похибкою, що використовує ШНМ, дозволяє забезпечити задану точність чисельного розв'язку СДР.

2. Використання раціонального кроку інтегрування виключає надмірні обчислювальні витрати й істотно підвищує ефективність обчислювального алгоритму.

3. Вирішення проблеми керування похибкою обчислення ФО робить можливим використання для розв'язання задачі оптимального проектування ШСК алгоритму на основі методу ковзного допуску, де критерієм ковзного допуску є допустима похибка обчислення ФО.

Основні матеріали розділу опубліковано в роботах [3, 5, 7].

У п'ятому розділі описано метод розв'язання задачі оптимального проектування кородуючих ШСК для реалізації концептуальної моделі.

Використано генетичний алгоритм спільно з методом штрафних функцій, адаптованим алгоритмом ковзного допуску та нейромережеским модулем керування похибкою обчислення ФО. Розроблений алгоритм дозволяє істотно знизити обчислювальні витрати при одночасному виконанні умови точності отриманого оптимального розв'язку.

Для зведення початкової задачі (1) до задачі на безумовний екстремум використано метод зовнішніх штрафних функцій. Початкова задача набуває наступного вигляду:

$$P(\bar{x}) = F(\bar{x}) + \sum_{i=1}^N H_i [\sigma_i^*(\bar{x}, t^*) - \sigma_i(\bar{x}, t^*)]; \quad H_i = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \sigma_i^*(\bar{x}, t^*) \geq \sigma_i(\bar{x}, t^*) \\ H^*, & \text{якщо } \sigma_i^*(\bar{x}, t^*) < \sigma_i(\bar{x}, t^*) \end{cases} \quad (10)$$

де  $H^*$  – штрафний коефіцієнт.

Для розв'язання задачі безумовної оптимізації застосовано генетичний алгоритм. Автором запропоновано новий спосіб кодування множини розв'язків задачі. Хромосома представляє собою множину індексів, що визначають положення розмірів перерізів у тривимірному масиві, де номер шару (тип перерізу) визначається непарними індексами, номер рядка (типорозмір перерізу) – парними. Таким чином, кількість генів у хромосомі дорівнює  $2N$ , де  $N$  – кількість стержневих елементів, оптимальні параметри яких потрібно визначити. На рис. 6 і 7 показано множину розв'язків оптимізаційної задачі і спосіб кодування хромосоми.

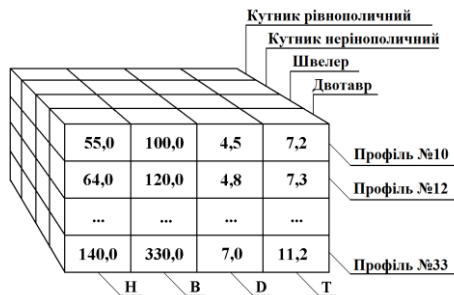


Рис. 6 – Множина розв'язків задачі

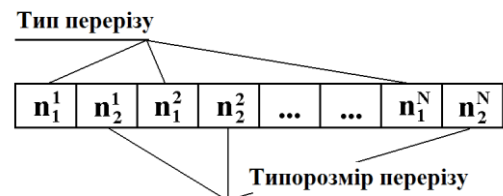


Рис. 7 – Приклад кодування хромосоми

Можливість керування похибкою обчислення функцій обмежень дозволяє істотно збільшити ефективність оптимізаційного алгоритму. Для цього в роботі спільно з генетичним алгоритмом використано метод ковзного допуску.

При використанні методу ковзного допуску система обмежень задачі (1) представляється у вигляді:

$$X_D : \{\bar{x} \in E^n \mid g_1(\bar{x}) = Y(k) - T(\bar{x}, t^*) \geq 0\}, \quad (11)$$

де  $Y$  – критерій ковзного допуску (ККД) – спадна функція номера ітерації  $k$  при розв'язанні задачі оптимізації,  $T$  – функціонал над усією множиною обмежень.

В якості  $Y$  приймалася допустима похибка обчислення ФО, в якості  $T$  – відносна похибка обчислення ФО. Розв'язок задачі шукався як на границі допустимої області, так і за її межами на відстані, що визначається критерієм ковзного допуску. Точка простору розв'язків може бути класифікована як допустима, майже допустима або недопустима.

У цьому випадку на початкових ітераціях пошуку похибка обчислення ФО може бути досить високою, що дозволяє мінімізувати обчислювальні витрати, в околі ж екстремуму похибка не перевищує деякої допустимої величини, що визначається замовником. Загальну схему алгоритму розв'язання задачі оптимізації представлено на рис. 8.

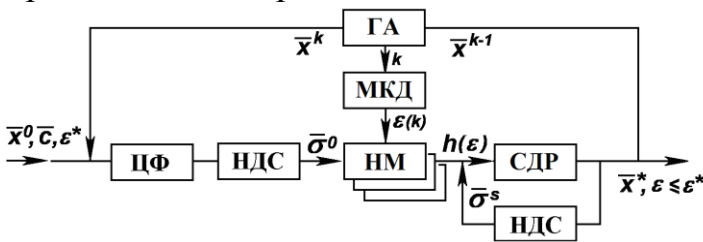


Рис. 8 – Схема методу розв'язання задачі оптимізації

На рис. 8: ЦФ – модуль обчислення цільової функції; НДС – модуль розв'язання задачі напружено-деформованого стану; НМ – модуль визначення параметрів чисельного розв'язання СДР за допомогою ШНМ; СДР – модуль розв'язання системи диференціальних рівнянь, що

моделюють процес корозії в елементах конструкції; ГА – модуль розв'язання оптимізаційної задачі за допомогою генетичного алгоритму; МКД – модуль методу ковзного допуску.

У процесі розв'язання задачі, згідно ідеї МКД, значення критерію ковзного допуску (допустимої похибки обчислення функції обмежень) повинне зменшуватися при наближенні до екстремуму. Пропонується зменшувати ККД залежно від номера епохи при роботі ГА:

$$Y(k) = \varepsilon_k = \varepsilon_{\max} - \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{n} \cdot \text{int}\left(\frac{k \cdot n}{k_{\max}}\right), \quad (12)$$

де  $k_{\max}$  – максимальна кількість епох;  $n$  – кількість кроків зміни ККД;  $\varepsilon_{\max}$ ,  $\varepsilon_{\min}$  – допустимі значення похибок на початковому етапі розв'язання задачі і в околі екстремуму.

Штрафні доданки у функції (9) будуть визначатися за формулою:

$$H = H * \left( Y(k) - \frac{|t^* - t[\bar{x}, h_t(\bar{x}, Y(k))]|}{t^*} \right), \quad (13)$$

де  $h_t$  – параметр чисельного розв’язання СДР (2), що залежить від значень варійованих параметрів і допустимої похибки на  $k$ -й епосі при реалізації генетичного алгоритму.

Для чисельної ілюстрації можливостей адаптованого методу ковзного допуску в якості об’єкта дослідження використано статично невизначену ШСК, зображену на рис. 9, що повинна була зберігати свою несучу здатність протягом 2,5 років.

При розв’язанні оптимізаційної задачі використовувалася початкова популяція з 750 особин. Об’єм популяції визначався на основі аналізу попередніх результатів чисельних експериментів.

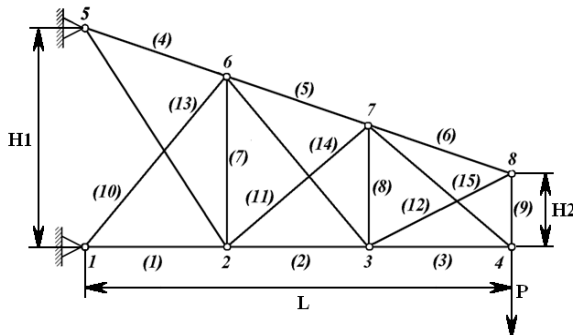


Рис. 9 – Розрахункова схема 15-елементної ШСК

Максимальна похибка обчислення функції обмежень на початкових ітераціях складала 5%, мінімальна похибка на останніх ітераціях – 1%. Згідно з алгоритмом МКД, похибка обчислення функції обмежень знижувалася після кожних 20 епох або при досягненні

сходження популяції.

В якості критерію ефективності розробленого алгоритму бралася кількість звертань до процедури методу скінченних елементів у процесі пошуку оптимального розв’язку. У табл. 3 наведено результати тестування ефективності алгоритму.

У рядках табл. 3 наведено дані про кількість розв’язань задачі МСЕ:

- при використанні для обчислення ФО фіксованого кроку за часом, що забезпечує похибку, яка не перевищує  $\varepsilon_{\min}$  на всій множині варійованих параметрів;
- при використанні нейромережевого модуля;
- при використанні нейромережевого модуля спільно з МКД.

Таблиця 3

Аналіз ефективності алгоритму	
Алгоритм	Кількість звертань до МСЕ
ГА	10 287 508
НМ+ГА	3 618 484
МКД+НМ+ГА	1 528 043



Результати чисельного експерименту демонструють, що обчислювальні витрати для алгоритму, що використовує адаптований метод ковзного допуску, приблизно в 3 рази нижчі, ніж для алгоритму, що використовує нейромережевий модуль для отримання кроку, який забезпечує допустиму похибку розв'язку, без зменшення похибки під час пошуку розв'язку. Вони також приблизно в 6 разів нижчі, ніж обчислювальні витрати при використанні ГА, у якому для обчислення ФО застосовується фіксований крок, що забезпечує похибку, не більшу за  $\varepsilon_{\min}$ . Це підтверджує більш високу ефективність створеного автором методу порівняно з існуючими.

Основні матеріали розділу опубліковано в роботах [2, 8, 9, 10, 11].

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу розробки моделей та методів керованого за точністю чисельного аналізу кородуючих ШСК. Це дозволяє скоротити термін проектування, матеріальні витрати і підвищити якість проектування таких конструкцій.

У процесі виконання роботи отримано нові наукові і практичні результати.

1. Проведено аналіз предметної області та визначено проблемні аспекти при моделюванні процесу корозійного деформування ШСК, зокрема проблеми точності чисельного аналізу.

На основі інформації про проблемні аспекти вирішення поставленої задачі розроблено нову концептуальну модель визначення оптимальних параметрів кородуючих шарнірно-стержневих конструкцій. Вона відрізняється від існуючих тим, що пошук оптимального проекту здійснюється на дискретній множині розв'язків (множині індексів), використовуються удосконалена модель процесу корозійного деформування і новий метод керування похибкою обчислення функції обмежень оптимізаційної задачі. Дана концептуальна модель дозволяє побудувати метод керованого за точністю чисельного аналізу й оптимального проектування кородуючих ШСК.

2. Уперше розроблено метод керування похибкою обчислення функції обмежень оптимізаційної задачі із застосуванням штучних нейронних мереж, що вперше дозволило визначити параметри обчислювальних процедур у процесі розв'язання задачі на підставі інформації про необхідну точність і параметри досліджуваного об'єкта. Побудовано функцію, яка апроксимує залежність параметрів чисельного розв'язання СДР, що описує корозійний процес, від параметрів конструкції, агресивного середовища і критерію ковзного допуску.

3. Уперше розроблено метод розв'язання оптимізаційної задачі на основі генетичних алгоритмів та методу ковзного допуску для реалізації нової концептуальної моделі, який, на відміну від існуючих, дозволяє змінювати в процесі розв'язання задачі похибку обчислення функцій обмежень, що зменшує обчислювальні витрати при одночасному забезпеченні заданої точності. На основі результатів чисельних експериментів проведено аналіз ефективності

запропонованого обчислювального методу. Результати аналізу демонструють, що використання розробленого методу дозволило зменшити обчислювальні витрати при розв'язанні розглянутих задач більш ніж у п'ять разів порівняно з відомими.

4. Удосконалено модель корозійного деформування ШСК шляхом створення нових моделей кородуючих перерізів стержневих елементів, що вперше дозволило дослідити процес зміни напружень в елементах таких конструкцій.

5. Отримані результати використано в ТОВ «Дніпровська холдингова компанія» при проведенні експертних оцінок залишкової несучої здатності та розробці нових конструкторських проектів металоконструкцій промислових будівель з урахуванням впливу агресивних середовищ, а саме:

- уточненні прогнозних оцінок запасу несучої здатності металоконструкцій із використанням нових моделей кородуючих перерізів;
- обґрунтованому визначенні термінів та змісту ремонтно-монтажних робіт;
- розробці нових конструкторських проектів з використанням оптимізаційного методу в сенсі визначення оптимальних параметрів металоконструкцій за критеріями металомісткості при забезпеченні їх необхідної довговічності.

Результати досліджень використано в навчальному процесі ДВНЗ УДХТУ при викладанні дисциплін «Математичне моделювання хіміко-технологічних процесів», «Методи еволюційного моделювання», «Нейронні мережі», «Методи дослідження операцій», а також при виконанні дипломних робіт бакалаврів і магістрів.

Достовірність основних положень і результатів підтверджується обґрунтуванням та чіткістю формулювань математичних задач, порівнянням отриманих розрахунків з аналітичними і чисельними результатами інших науковців, а також експертними оцінками фахівців під час обговорення дисертації на наукових семінарах та конференціях.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Зеленцов, Д. Г. Математические модели сечений элементов шарнирно-стержневых конструкций, подверженных воздействию агрессивных сред / Д. Г. Зеленцов, Л. В. Новикова, О. Р. Денисюк // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2015. – №2(53). – С. 146–151.
2. Зеленцов, Д. Г. Алгоритм решения задач оптимизации корродирующих конструкций на основе метода скользящего допуска / Д. Г. Зеленцов, О. Р. Денисюк // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – №2(28). – С. 51–57.
3. Zelentsov, D. G. Determination of Rational Numerical Solution Parameters for Some Classes of Systems of Differential Equations / D. G. Zelentsov, O. R. Denysiuk // Ежемесячный международный научный журнал «NOVATION». – № 4 (июль 2016), часть 1. – Варна, Болгария, 2016. – С. 34–37.
4. Денисюк, О. Р. Способ повышения эффективности вычислительных методов моделирования поведения корродирующих конструкций / О. Р. Денисюк, Д. Г. Зеленцов // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия:

Компьютерные системы и информационные технологии в образовании, науке и управлении: сб. научн. тр. – Днепр, ПГАСА, 2016. – Вып. 94. – С. 36–43.

5. Денисюк, О. Р. Определение рациональных параметров численного решения систем дифференциальных уравнений / О. Р. Денисюк // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2016. – №3(58). – С. 208–212.

6. Новикова, Л. В. Методика построения математических моделей корродирующих сечений элементов шарнирно-стержневых систем / Л. В. Новикова, О. Р. Денисюк // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (м. Дніпропетровськ, 24–26 березня 2015 р.). – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2015. – С. 42.

7. Денисюк, О. Р. Использование нейронных сетей в численном моделировании поведения корродирующих шарнирно-стержневых конструкций / О. Р. Денисюк // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем: матеріали І Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Дніпропетровськ, 3–5 листопада 2015 р.). – Дніпропетровськ, УДХТУ, 2015. – С. 28–31.

8. Зеленцов, Д. Г. Адаптация метода скользящего допуска для решения задач оптимизации корродирующих конструкций / Д. Г. Зеленцов, О. Р. Денисюк // Інформатика та системні науки (ІСН-2016): матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції за міжнародною участю (м. Полтава, 10–12 берез. 2016 р.). – Полтава: ПУЕТ, 2016. – С. 123–125.

9. Денисюк, О. Р. Оптимальное проектирование корродирующих конструкций с использованием метода скользящего допуска / О. Р. Денисюк, Д. Г. Зеленцов // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (м. Дніпропетровськ, 29–31 березня 2016 р.). – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2016. – С. 43.

10. Зеленцов, Д. Г. Использование нейросетевых моделей в алгоритмах оптимизации на основе метода скользящего допуска [Электронный ресурс] / Д. Г. Зеленцов, О. Р. Денисюк // Геоинформационные системы и компьютерные технологии эколого-экономического мониторинга – 2016 (сборник докладов международной научно-технической конференции, 13–15 апреля 2016 г.) – Дніпропетровськ: НГУ, 2016. – Режим доступа: [http://gis.dp.ua/conf2016-publications/sections/iad/10\\_zelentzov\\_denisuk.pdf](http://gis.dp.ua/conf2016-publications/sections/iad/10_zelentzov_denisuk.pdf) (дата звернення 01.10.2016). – Назва з екрана.

11. Зеленцов, Д. Г. Анализ эффективности алгоритмов на основе метода скользящего допуска в задачах оптимизации корродирующих конструкций / Д. Г. Зеленцов, О. Р. Денисюк // Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях. Праці міжнародної науково-технічної конференції (м. Харків, 26–31 травня 2016 р.). – Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2016. – С. 153–155.

## АННОТАЦИЯ

**Денисюк О.Р. Модели и методы управляемого по точности численного анализа корродирующих шарнирно-стержневых конструкций.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина. – Харьков, 2016.

Диссертация посвящена повышению качества и достоверности конструкторских решений при проектировании корродирующих шарнирно-стержневых конструкций за счет обеспечения точности вычисления сложных функций ограничений при приемлемых вычислительных затратах.

Во многих отраслях промышленности технологические процессы требуют использования рабочих сред, агрессивных по отношению к конструкционным материалам. Последствием влияния таких сред на элементы конструкций является коррозионный износ, то есть разрушение поверхностных слоев металла, что приводит к ухудшению рабочих характеристик металлоконструкций. Игнорирование влияния агрессивной среды на стадии проектирования может привести к преждевременному выходу конструкций из строя и связанным с этим значительным экономическим потерям.

Автором создана новая концептуальная модель оптимального проектирования корродирующих шарнирно-стержневых конструкций, отличающаяся от существующих тем, что поиск оптимального проекта осуществляется на дискретном множестве решений (множестве индексов), используется усовершенствованная модель процесса коррозионного деформирования и новый метод управления погрешностью вычисления функций ограничений.

Автором проведено усовершенствование модели процесса коррозионного деформирования шарнирно-стержневых конструкций путем разработки новых моделей корродирующих сечений стержневых элементов, позволяющих описать процесс изменения во времени геометрических характеристик сечений с учетом изменения положения их главных осей. Использование новых моделей позволило исследовать процесс коррозии в реальных конструкциях, изготовленных из стандартных профилей (двутавр, швеллер, равнополочный и неравнополочный уголок).

В работе предлагается новый метод управления погрешностью вычисления функций ограничений оптимизационной задачи с использованием искусственных нейронных сетей. Построена функция, аппроксимирующая зависимость параметров численного решения систем дифференциальных уравнений, описывающих коррозионный процесс, от параметров конструкции, агрессивной среды и погрешности решения.

Для реализации предложенной концептуальной модели разработан новый вычислительный метод на основе метода скользящего допуска, где в качестве

критерия скользящего допуска принимается допустимая погрешность, а в качестве функционала над множеством функций ограничений – относительная погрешность вычисления функций ограничений. Предложена адаптация генетического алгоритма для решения задач дискретной оптимизации корродирующих шарнирно-стержневых конструкций. На основании результатов численных экспериментов проведен анализ эффективности предложенного вычислительного алгоритма. Результаты анализа демонстрируют, что использование разработанного метода позволило уменьшить вычислительные затраты при решении рассматриваемых задач более чем в пять раз по сравнению с известными методами.

С помощью созданного автором программного комплекса проведен ряд вычислительных экспериментов и решен ряд новых задач дискретной оптимизации корродирующих шарнирно-стержневых конструкций. Результаты экспериментов подтверждают эффективность и точность разработанного автором метода.

***Ключевые слова:** корродирующие конструкции, дискретная оптимизация, метод скользящего допуска, искусственные нейронные сети, модели корродирующих сечений, генетические алгоритмы.*

## АНОТАЦІЯ

**Денисюк О.Р. Моделі та методи керованого за точністю чисельного аналізу кородуючих шарнірно-стержневих конструкцій.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна. – Харків, 2016.

Дисертація присвячена підвищенню якості та достовірності конструкторських рішень при проектуванні кородуючих шарнірно-стержневих конструкцій за рахунок забезпечення точності обчислення складних функцій обмежень при прийятних обчислювальних витратах.

Розроблено нову концептуальну модель оптимального проектування кородуючих шарнірно-стержневих конструкцій.

Розроблено нові моделі кородуючих перерізів стержневих елементів, унаслідок чого удосконалено модель корозійного деформування шарнірно-стержневих конструкцій, що дозволило дослідити процес корозії в реальних конструкціях.

Розроблено новий метод керування похибкою обчислення функцій обмежень оптимізаційної задачі з використанням штучних нейронних мереж.

Для реалізації концептуальної моделі розроблено обчислювальний метод на основі методу ковзного допуску, де в якості критерію ковзного допуску приймається допустима похибка, а в якості функціоналу над множиною функцій обмежень – відносна похибка обчислення функцій обмежень. Запропоновано адаптацію генетичного алгоритму для розв'язання задач дискретної оптимізації кородуючих шарнірно-стержневих конструкцій. Використання розробленого методу дозволило зменшити обчислювальні витрати при розв'язанні розглянутих задач більш ніж у п'ять разів порівняно з відомими методами.

За допомогою створеного автором програмного комплексу проведено ряд обчислювальних експериментів, результати яких підтверджують ефективність і точність розробленого автором методу.

**Ключові слова:** *кородуючі конструкції, дискретна оптимізація, метод ковзного допуску, штучні нейронні мережі, моделі кородуючих перерізів, генетичні алгоритми.*

## ABSTRACT

**Denysiuk O.R. Models and methods for controlled by accuracy numerical analysis of corroding hinged-rod structures.** – The manuscript copyright.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 01.05.02 – Mathematical modeling and calculating methods. – Vasyl Karazin Kharkiv National University. – Kharkiv, 2016.

The thesis is devoted to the improvement of quality and reliability of design solutions in design of corroding hinged-rod structures by ensuring the accuracy of complex constraint functions calculation with acceptable calculation cost.

Author proposes a new conceptual model of corroding hinged-rod structures optimal design.

The new models of corroding cross-sections of rod elements are developed. Therefore the model of hinged-rod structures corrosion deformation process is improved. It makes investigation of corrosion process in real structures possible for the first time.

The new method of constraint function calculation error control using artificial neural networks is developed.

To implement the conceptual model a new numerical method is proposed. The method is based on flexible tolerance method, where the criterion of flexible tolerance is permissible constraint function calculation error, and the functional on the set of constraint functions is relative error. An adaptation of genetic algorithm for solutions of problems of hinged-rod structures discrete optimization is proposed. Utilization of developed method allowed to decrease numerical cost while solving the problems in question more than fivefold comparing with known methods.

Using the software developed by author numerical experiments were conducted. The results of experiments confirm effectiveness and accuracy of the new method.

**Keywords:** *corroding structures, discrete optimization, flexible tolerance method, artificial neural networks, corroding cross-sections models, genetic algorithms.*