

**Література**

1. Димань, Т. М. Екологія людини [Текст] / Т. М. Димань. — К.: Академія, 2009. — 376 с.
2. Manual on flood forecasting and warning [Text]. — Switzerland, Geneva: World Meteorological Organization, 2011. — № 1072. — 142 p.
3. Ward, R. Floods, a geographical perspective [Text] / R. Ward. — London: Macmillan, 1978. — 244 p.
4. System and method for predicting and preventing flooding [Electronic resource]: Patent WO 2013063699 A1 / Moss I., Tremblay R.; Insurance Bureau of Canada. — PCT/CA2012/050772; filed 31.10.2012; published 10.05.2013. — Available at: \www/URL: <http://www.google.com/patents/WO2013063699A1?cl=en>
5. Автоматичні гідрологічні станції [Електронний ресурс] // Український гідрометеорологічний центр. — Режим доступу: \www/URL: <http://hydro.meteo.gov.ua/>
6. Гребінь, В. В. Оцінка можливості оперативного прогнозування дощових паводків на річках басейнів Прута та Сірету [Текст] / В. В. Гребінь, О. І. Лук'янець, І. І. Ткачук // Український гідрологічний журнал. — 2012. — № 10. — С. 164–175.
7. Маслова, Т. В. Оцінювання зволоженості гірських водозборів при математичному моделюванні дощових паводків [Текст] / Т. В. Маслова, М. М. Сусідко // Наукові праці УкрНДГМІ. — 2007. — Вип. 256. — С. 233–238.
8. Zamikhovskii, L. M. The flood process mathematical modelling and their prediction methods based on static data [Text] / L. M. Zamikhovskii, A. P. Oliinyk, O. I. Klapoushchak, L. O. Shtaiyer // Life Science Journal. — 2014. — № 11(8s). — P. 473–477.
9. Олійник, А. П. До математичного прогнозування рівня паводкових вод [Текст] / А. П. Олійник, О. І. Клапоуцак // Прикарпатський вісник Наукового товариства ім. Шевченка. Серія «Число». — 2014. — № 1(28). — С. 246–253.
10. Андерсон, Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен [Текст]: пер. с англ. / Д. Андерсон, Дж. Таннехил, Р. Плетчер. — М.: Мир, 1990. — Т. 1. — 384 с.

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ УРАВНЕНИЙ РАЗВИТИЯ ПАВОДКОВЫХ ЯВЛЕНИЙ МЕТОДАМИ ОБЫЧНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ**

В работе предложена методика построения линейных и нелинейных моделей процесса распространения паводка с использованием методов воспроизведения вида уравнений, метода определителей и метода восстановления уравнений в рамках

нелинейных моделей. Проанализированы случаи, когда результаты восстановления совпадают (линейные модели), установлено модели нелинейного типа, аналитически связывают уровень паводка, время, и скорость, и ускорение развития паводка. Определены направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** паводковые явления, обыкновенные дифференциальные уравнения, линейные и нелинейные модели.

*Олійник Андрій Петрович, доктор технічних наук, професор, кафедра математичних методів у інженерії, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна.*

*Клапоуцак Оксана Ігорівна, кандидат технічних наук, асистент, кафедра комп'ютерних технологій в системах управління і автоматизації, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна, e-mail: [oksana\\_kl@meta.ua](mailto:oksana_kl@meta.ua).*

*Бачук Василь Васильович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, кафедра математичних методів у інженерії, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна.*

*Тихонюк Ірина Ярославівна, вчитель біології, Івано-Франківська загальноосвітня школа I-III ступенів № 10, Україна.*

*Олійник Андрей Петрович, доктор технических наук, профессор, кафедра математических методов в инженерии, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина.*

*Клапоуцак Оксана Игоревна, кандидат технических наук, ассистент, кафедра компьютерных технологий в системах управления и автоматизации, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина.*

*Бачук Василий Васильевич, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра математических методов в инженерии, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина.*

*Тыхонюк Ирина Ярославовна, учитель биологии, Ивано-Франковская общеобразовательная школа I-III ступеней № 10, Украина.*

*Olijnyk Andriy, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine.*

*Klapoushchak Oksana, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine, e-mail: [oksana\\_kl@meta.ua](mailto:oksana_kl@meta.ua).*

*Bachuk Vasil, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine.*

*Tykhoniuk Iryna, Ivano-Frankivsk School I-III levels № 10, Ukraine*

УДК 519.853

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.66650

**Зеленцов Д. Г.,  
Денисюк О. Р.**

## АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ КОРРОДИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СКОЛЬЗЯЩЕГО ДОПУСКА

В работе предлагается новый эффективный алгоритм решения задач оптимизации корродирующих шарнирно-стержневых конструкций, предполагающий получение решения с заданной точностью. Оптимизационный алгоритм использует метод скользящего допуска совместно с генетическим алгоритмом и нейросетевым модулем для управления погрешностью вычисления функций ограничений. Поиск решения осуществляется на дискретном неметрическом пространстве варьируемых параметров.

**Ключевые слова:** коррозия, дискретная оптимизация, метод скользящего допуска, нейронные сети, генетический алгоритм.

**1. Введение**

В процессе эксплуатации металлоконструкций, используемых, в частности, в химической промышлен-

ности, наблюдается заметное ухудшение их рабочих характеристик в результате коррозионного износа, вызываемого воздействием сильноагрессивных рабочих сред. Это проявляется в виде уменьшения геометрических

размеров конструктивных элементов, снижении несущей способности конструкций и преждевременном выходе их из строя. Можно выделить три вида потерь от коррозии: прямые потери — стоимость разрушенного вследствие коррозии металла, косвенные, связанные с экономическим ущербом в результате преждевременного выхода конструкций из строя, и потери, вызванные нерациональными конструкторскими решениями, что, в свою очередь, обусловлено отсутствием надежных, точных и эффективных методик оптимального проектирования.

При решении задач оптимального проектирования конструкций, подверженных воздействию агрессивных сред, важнейшим критерием выбора численного алгоритма является его эффективность (возможность получения решения с минимальными вычислительными затратами). Значимость этого критерия связана с затратами при вычислении функций ограничений (ФО).

В частности, при весовой оптимизации корродирующих конструкций вычисление ФО предполагает численное решение задачи напряженно-деформированного состояния, например, методом конечных элементов [1]. Наличие обратной связи в математических моделях расчета и существенное возрастание количества параметров, определяющих в произвольный момент времени геометрические размеры конструкции, обуславливают значительное увеличение вычислительных затрат при решении задач такого типа по сравнению с «классическими» задачами оптимизации. Это делает проблему эффективности численных алгоритмов особенно актуальной для задач данного класса.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Обзор исследований по проблеме использования методов нелинейного математического программирования при решении задач оптимального проектирования конструкций, подверженных воздействию агрессивных сред, достаточно полно представлен в [2]. Как отмечено в этой работе, основным требованием, предъявляемым к методам, является их эффективность при обеспечении требуемой точности получаемого решения. За годы, прошедшие после выхода обзора, получили развитие различные алгоритмы метода скользящего допуска (МСД), позволяющие уменьшить вычислительные затраты за счет изменения точности вычисления функций ограничений на различных этапах решения задачи оптимизации [3]. Однако существующие алгоритмы этого метода не гарантируют получения результата с требуемой точностью. Для этого необходим алгоритм управления погрешностью численного решения систем дифференциальных уравнений (СДУ), моделирующих процесс накопления геометрических повреждений в элементах конструкций.

В работе [4], очевидно, впервые было предложено использовать искусственные нейронные сети (ИНС) для определения параметров численного решения СДУ, обеспечивающих для текущего вектора варьируемых параметров заданную точность решения. В дальнейшем эта идея была использована при создании алгоритма управления точностью численного решения СДУ [4].

Работы [4, 5] были посвящены решению задач оптимизации корродирующих шарнирно-стержневых

конструкций (ШСК) на непрерывном множестве варьируемых параметров, что существенно снижало их практическое применение. Значительно больший интерес, по мнению авторов, представляют постановки задач, предполагающие дискретное изменение размеров сечений стержневых элементов. Как правило, ШСК изготавливаются из прокатных профилей, размеры сечений которых регламентированы стандартами. Варьируемыми параметрами в такой постановке могут быть тип и типоразмер профиля. Таким образом, имеет место задача дискретной оптимизации комбинаторного типа, решение которой ищется на неметрическом множестве (множестве индексов).

Для решения таких задач с успехом используются генетические алгоритмы (ГА) [6–9]. При реализации ГА используется информация только о целевой функции и функциях ограничений, следовательно, их эффективность объективно ниже, чем у методов математического программирования, использующих их производные. Использование метода скользящего допуска совместно с ГА и нейросетевым алгоритмом управления точностью позволит существенно уменьшить вычислительные затраты при оптимизации корродирующих конструкций и обеспечить требуемую точность решения задачи.

## 3. Объект, цель и задачи исследования

*Объект исследования* — проблема повышения точности и эффективности алгоритмов оптимизации корродирующих конструкций.

*Предмет исследования* — алгоритмы метода скользящего допуска применительно к задачам дискретной оптимизации конструкций, функционирующих в агрессивных средах.

*Цель работы* состоит в разработке эффективного алгоритма метода скользящего допуска, позволяющего получать решение с требуемой точностью.

Достижение поставленной цели подразумевает решение следующих задач:

- математическая формулировка новой задачи дискретной оптимизации шарнирно-стержневых конструкций с учетом происходящих в них физико-химических процессов;
- адаптация алгоритма метода скользящего допуска для решения задачи математического программирования с ограничениями в дискретном пространстве;
- постановка задачи управления точностью вычислений функций ограничений и ее реализация с помощью нейросетевых алгоритмов.

## 4. Оптимальное проектирование корродирующих шарнирно-стержневых конструкций

**4.1. Постановка задачи оптимального проектирования.** Постановка задачи оптимального проектирования корродирующих ШСК может быть сформулирована следующим образом. Следует определить параметры сечений элементов, таким образом, чтобы объем конструкции был минимальным, и в течение заданного срока эксплуатации она сохраняла несущую способность, т. е. удовлетворяла ограничениям по прочности и устойчивости:

$$F(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N L_i A_i(\bar{x}) \rightarrow \min; \quad \bar{x} \in X_D,$$

$$X_D: \{\bar{x} \in E^n \mid g_1(\bar{x}) = [\sigma] - \sigma_i(\bar{x}, t^*) \geq 0;$$

$$g_2(\bar{x}) = \sigma_j^*(\bar{x}, t^*) - \sigma_j(\bar{x}, t^*) \geq 0; i \in \overline{1, N}; j \in J\}, \quad (1)$$

где  $L_i, A_i$  — длина и площадь сечения  $i$ -го элемента;  $N$  — количество элементов конструкции;  $\bar{x}$  — вектор варьируемых параметров;  $\sigma_i$  — текущее напряжение в  $i$ -м элементе;  $[\sigma]_j$  и  $\sigma_j^*$  — предельное значение напряжения и критическое напряжение потери устойчивости в  $j$ -м элементе;  $J$  — множество элементов, работающих на сжатие;  $t^*$  — заданное время эксплуатации конструкции.

Поведение конструкции в агрессивной среде моделируется путем численного решения задачи Коши для системы дифференциальных уравнений вида:

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

где  $\delta_i$  — глубина коррозионного поражения в  $i$ -м элементе;  $v_0$  — скорость коррозии при отсутствии напряжения;  $\psi_i$  — известная функция напряжения.

Вычисление функций напряжений предполагает решение системы уравнений механики, состоящей из системы уравнений равновесия и совместности деформаций, соотношений Коши и закона Гука:

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

где  $K, D, E$  — матрицы жесткости, дифференцирования и упругости;  $\bar{R}, \bar{u}, \bar{\varepsilon}, \bar{\sigma}$  — векторы внешних нагрузок, узловых перемещений, деформаций и напряжений.

Так как в общем случае для ее решения используются численные методы, например, метод конечных элементов (МКЭ), то возможно только численное решение СДУ. Параметры численного решения СДУ являются входными параметрами и не меняются (как правило), в процессе решения задачи. Очевидно, что вычислительные затраты на решение такой задачи многократно превышают те, которые необходимы для решения «классической» задачи оптимизации. Погрешность получаемого результата в этом случае не поддается прогнозу.

**4.2. Адаптация метода скользящего допуска.** Стратегия МСД состоит в том, что исходная задача преобразуется к виду:

$$X_D: \{\bar{x} \in E^n \mid g_1(\bar{x}) = Y(k) - T(\bar{x}, t^*) \geq 0\}, \quad (4)$$

где  $Y$  — критерий скользящего допуска (КСД) — убывающая функция номера итерации  $k$  при решении задачи нелинейного программирования (НЛП);  $T$  — функционал над всем множеством функций ограничений [10]. В качестве  $Y$  предлагается принять допустимую погрешность вычисления ФО, в качестве  $T$  — относительную по-

грешность вычисления ФО. Решение задачи ищется как на границе допустимой области пространства решений, так и за ее пределами на расстоянии, определяемом критерием скользящего допуска. Точка пространства решений может быть классифицирована как допустимая, почти допустимая и недопустимая.

В этом случае на начальных итерациях поиска решения погрешность вычисления ФО может быть достаточно высокой, что позволяет минимизировать вычислительные затраты, в окрестности же экстремума погрешность не превышает некоторой допустимой величины, определяемой заказчиком.

Выбор функции критерия скользящего допуска во многом определяется методом решения задачи НЛП и не представляет затруднений. Вычисление функционала  $T$  предполагает решение задачи управления погрешностью вычислений ФО.

**4.3. Алгоритм управления погрешностью.** Представим входные данные, необходимые для вычисления ФО в виде 4-х векторов:  $\bar{x}$  — вектор варьируемых параметров;  $\bar{y}$  — вектор параметров конструкции;  $\bar{c}$  — вектор параметров АС;  $\bar{h}$  — вектор параметров вычислительных процедур. Вектора  $\bar{y}$  и  $\bar{c}$  изменяются при переходе к новой задаче, вектор  $\bar{x}$  изменяется в процессе решения данной задачи. Если при этом вектор  $\bar{h}$  остается неизменным, то при любом изменении какого-либо элемента первых трех векторов погрешность вычисления ФО будет меняться. Контролировать погрешность, а, тем более, управлять ею при таком подходе невозможно. Необходимо научиться определять параметры вычислительных процедур в процессе решения задачи на основании информации о параметрах конструкции (варьируемых и постоянных), параметрах АС и величины допустимой погрешности. Другими словами, необходимо получить аппроксимирующую функцию, формализующую эту зависимость. Для этого следует решить следующие частные задачи:

- выбрать алгоритм решения СДУ и параметр управления;
- определить значимые параметры и способ аппроксимации;
- построить аппроксимирующую функцию.

Рассмотрим подробнее задачу получения эталонных решений для построения аппроксимирующей функции. Сформулируем условия ее решения:

1. Исходная СДУ путем внесения в нее некоторых изменений может быть преобразована в новую, для которой получить эталонное решение не представляет труда.
2. Погрешности численных решений обеих систем не должны существенно отличаться на заданном множестве значений параметра вычислительной процедуры. Решения этих двух систем могут при этом отличаться весьма существенно.

На изменение напряжения в стержневом элементе влияют два фактора: уменьшение площади сечения  $A_i$  вследствие коррозии и изменение величины осевого усилия  $Q_i$ . Первый фактор зависит от глубины коррозионного поражения только в данном элементе, второй — от глубины коррозионного поражения во всех элементах конструкции  $\bar{\delta}$ . Тогда для линейной функции напряжений (2) запишется в виде:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 [1 + k\sigma_i(A_i(\delta_i), Q_i(\bar{\delta}))]; \quad \delta_i|_{t=0} = 0; \quad i = \overline{1, N}. \quad (5)$$

Если пренебречь изменением во времени величины осевого усилия, то система (5) преобразуется в систему, которая является простой совокупностью несвязанных ДУ:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 [1 + k\sigma_i(A_i(\delta_i), Q_i)]; \delta_i|_{t=0} = 0; i = \overline{1, N}. \quad (6)$$

Для каждого из этих уравнений может быть получено аналитическое решение вида [4]:

$$t_i^* = t_i - \frac{2kQ_i}{v_0 d_i} \ln \left\{ \frac{(P_i + d_i - 2a_i \delta_i)(P_i - d_i)}{(P_i - d_i - 2a_i \delta_i)(P_i + d_i)} \right\};$$

$$t_i = \delta_i^{\min} / v_0; \quad d_i = \sqrt{4a_i(A_i + kQ_i) - P_i^2};$$

$$t^* = \min \{t_1^*, t_2^*, t_3^*, \dots, t_N^*\}, \quad (7)$$

где  $P_i$  — периметр  $i$ -го элемента;  $a_i, d_i$  — коэффициенты.

Долговечность всей конструкции, очевидно, будет определяться временем жизни наименее долговечного стержня. Таким образом, первое условие выполнено. Так как скорость изменения площади сечения значительно выше, чем скорость изменения осевого усилия, что доказано большим объемом численных экспериментов, то выполняется и второе условие. Таким образом, система (6) не может использоваться для вычисления ФО ввиду того, что изменение внутренних усилий может быть весьма значительным, но может использоваться для получения аппроксимирующей функции, которая строится для отдельного стержневого элемента.

Аппроксимировать зависимость между параметром численного алгоритма решения СДУ, параметрами стержневого элемента, АС и допустимой погрешностью решения предлагается с помощью искусственной нейронной сети. На рис. 1 показана архитектура нейронной сети для растянутых и сжатых стержней. Они отличаются входными параметрами.

Для растянутого стержня значимыми параметрами являются площадь и периметр сечения, начальное напряжение и скорость коррозии. Так как форма сечения при этом значения не имеет, в качестве эквивалентного сечения предлагается использовать кольцо с площадью и периметром сечения, соответствующими реальному сечению. Входные параметры нейронной сети при этом — внешний радиус  $R$ , отношение внутреннего радиуса к внешнему  $g$ , начальное напряжение  $\sigma_0$ , скорость коррозии при отсутствии напряжений  $v_0$  и допустимая погрешность решения  $\varepsilon^*$ .

Для сжатого стержня форма сечения является важнейшим параметром, так как она определяет правила вычисления момента инерции сечения. Для каждого типа сечения (двутавр, швеллер, равнополочный и неравнополочный уголок) обучается своя сеть.

Все размеры фасонных профилей регламентируются стандартами, поэтому в качестве входного параметра вместо радиусов, которые применялись в случае рас-

тянутого стержня, используется номер строки матрицы размеров сечения соответствующего профиля  $n$ . Длина стержня оказывает существенное влияние на значение критического напряжения потери устойчивости. Она может быть пересчитана по величине начального критического напряжения потери устойчивости  $\sigma_0^*$ , которое является дополнительным входным параметром для данной ИНС.

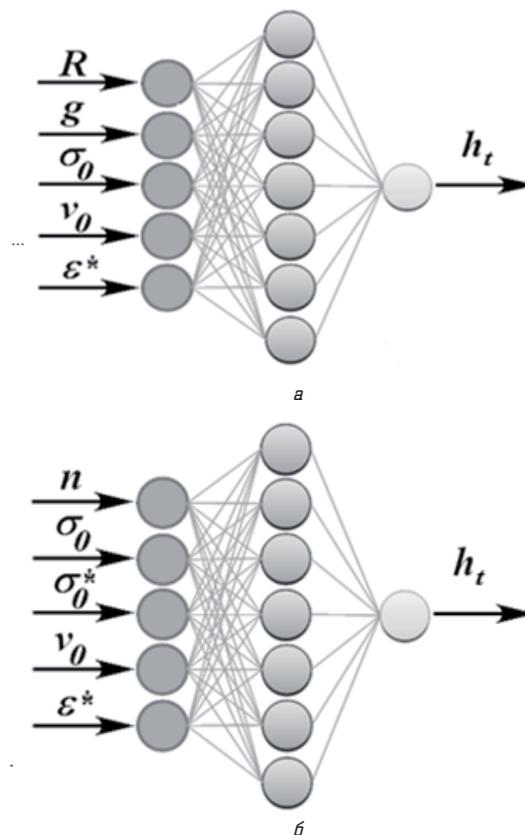


Рис. 1. Архитектура нейронной сети для растянутого (а) и сжатого (б) стержней

Сети обучались с помощью алгоритма обратного распространения ошибки [11].

**4.4. Использование генетического алгоритма.** Общая схема решения задачи оптимального проектирования корродирующих ШСК с помощью адаптированного МСД показана на рис. 2.

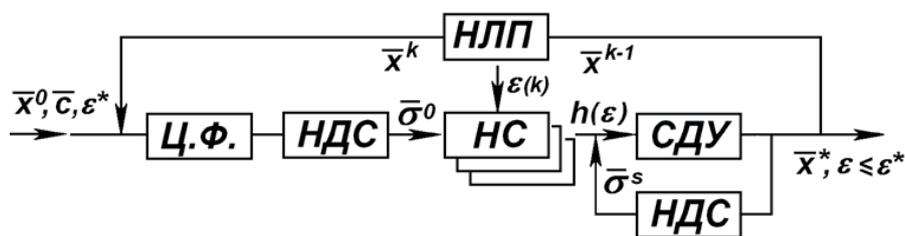


Рис. 2. Схема решения задачи оптимизации ШСК методом скользящего допуска

На рис. 2: Ц.Ф. — модуль вычисления целевой функции; НДС — модуль решения задачи напряженно-деформированного состояния; НС — модуль определения

параметров численного решения с помощью ИНС; СДУ – модуль решения системы дифференциальных уравнений, моделирующих процесс коррозии в элементах конструкции; НЛП – модуль решения задачи нелинейного программирования.

Задача формулировалась как задача дискретной оптимизации комбинаторного типа. Задача условной оптимизации приводится к задаче на безусловный экстремум методом штрафных функций:

$$P(\bar{x}) = F(\bar{x}) + H_i \frac{|t(\bar{x}, h_i(\bar{x}, s) - t^*|}{t^*};$$

$$H_i = \begin{cases} 0, & \text{если } t \geq t^*, \\ H^*, & \text{если } t < t^*, \end{cases} \quad (8)$$

где  $H^*$  – штрафной коэффициент;  $s$  – номер эпохи при решении задачи оптимизации.

Для решения безусловно-экстремальной задачи использовался целочисленный генетический алгоритм. В качестве генов в хромосоме служили номер типа (двутавр, швеллер, равнополочный и неравнополочный уголки) и типоразмера стандартного сечения для каждого из элементов ШСК. Пример хромосомы представлен на рис. 3.

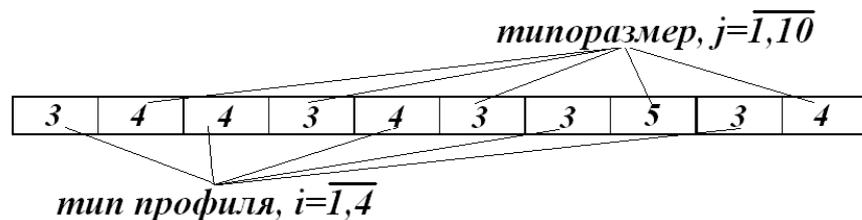


Рис. 3. Пример хромосомы для пятиэлементной шарнирно-стержневой конструкции

В генетическом алгоритме реализованы операторы одноточечного кроссовера, мутации и турнирного отбора [12]. В процессе решения задачи, согласно идее МСД, значение критерия скользящего допуска (допустимой погрешности вычисления функции ограничений) должно уменьшаться по мере приближения к экстремуму. Предлагается уменьшать КСД в зависимости от номера эпохи при работе ГА:

$$Y(s) = \varepsilon_k = \varepsilon_{\max} - \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{n} \cdot \text{int} \left( \frac{s \cdot n}{S_{\max}} \right), \quad (9)$$

где  $S_{\max}$  – максимальное количество эпох;  $n$  – количество шагов изменения КСД.

**5. Тестирование алгоритма адаптированного метода скользящего допуска**

**5.1. Результаты тестирования нейросетевого алгоритма управления погрешностью решения.** При тестировании алгоритма управления погрешностью вычисления долговечности ШСК в качестве объекта исследований использовалась статически неопределимая шарнирно-стержневая конструкция (рис. 4).

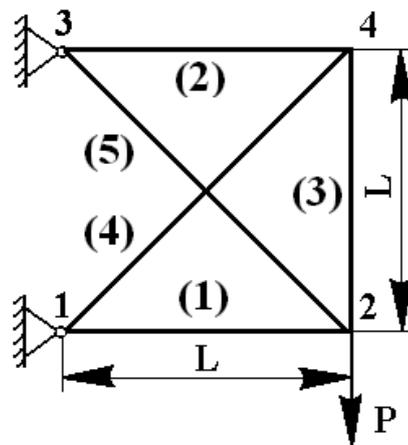


Рис. 4. Расчетная схема пятиэлементной ШСК

Нейронные сети обучались и тестировались для трех видов активных ограничений: по прочности, по устойчивости и по сплошности сечения (для двутавра и швеллера). При этом в каждой из задач были отдельно получены матрицы весовых коэффициентов для каждого из используемых видов профилей. При тестировании задача управления погрешностью решалась для конструкций, долговечность которых составляла от 2,25 до 2,75 года.

В табл. 1 представлены результаты тестирования алгоритма при активных ограничениях по сплошности сечения (долговечность конструкции  $t^* = 2,277$  года).

Таблица 1

Результаты тестирования алгоритма управления погрешностью решения (активные ограничения по сплошности)

$\varepsilon^*$ , %	$\varepsilon$ , %	$h_i$ , лет	$N$
1,0	0,806	0,0429	56
2,0	1,812	0,0992	24
3,0	3,040	0,1784	14
4,0	4,023	0,2728	10
5,0	5,286	0,3734	8

**Примечание:**  $\varepsilon^*$  — заданная погрешность решения задачи;  $\varepsilon$  — полученная погрешность решения задачи;  $h_i$  — расстояние между узлами на интервале изменения времени;  $N$  — количество узловых точек на временном интервале

В табл. 2 и 3 приведены результаты тестирования алгоритма при активных ограничениях по прочности (долговечность конструкции  $t^* = 2,454$  года) и устойчивости (долговечность конструкции  $t^* = 2,463$  года).

Таблица 2

Результаты тестирования алгоритма управления погрешностью решения (активные ограничения по прочности)

$\varepsilon^*$ , %	$\varepsilon$ , %	$h_i$ , лет	$N$
1,0	0,543	0,0243	103
2,0	1,681	0,0532	48
3,0	2,591	0,0996	26
4,0	3,769	0,1553	17
5,0	4,783	0,2132	13

Таблица 3

Результаты тестирования алгоритма управления погрешностью решения (активные ограничения по устойчивости)

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

**5.2. Решение задачи оптимизации.** При решении оптимизационной задачи использовалась начальная популяция из 250 особей. Объектом исследований служила пятистержневая ШСК, показанная на рис. 4. Конструкция должна была сохранять свою несущую способность в течение 2,5 лет.

Задача оптимизации решалась на протяжении 100 эпох или до достижения полного схождения популяции. При этом, согласно алгоритму метода скользящего допуска, погрешность вычисления функции ограничений снижалась после каждых 20 эпох или при достижении схождения популяции, что позволило снизить вычислительные затраты на ранних этапах оптимизации, а вблизи точки экстремума обеспечить получение численного решения с погрешностью, не превышающей заданной заказчиком допустимой величины. В данном случае максимальная погрешность вычисления функции ограничений на начальных итерациях поиска составила 5 %, минимальная погрешность на последних итерациях — 1 %.

Оптимальные сечения элементов ШСК, полученные в результате решения задачи, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Оптимальные сечения стержней

№	Тип сечения	Типоразмер	$t$ , лет
1	Уголок	125 × 125 × 9	2,52948
2	Уголок	125 × 80 × 8	2,56995
3	Уголок	125 × 80 × 8	2,57016
4	Уголок	140 × 140 × 10	2,69019
5	Уголок	125 × 125 × 9	2,55430

Объем полученной конструкции составил 34604,42 см<sup>3</sup>.

## 6. Обсуждение результатов сравнения эффективности оптимизационных алгоритмов

В качестве критерия эффективности разработанного алгоритма принималось количество обращений к процедуре метода конечных элементов в процессе поиска оптимального решения. В табл. 5 показаны результаты тестирования эффективности алгоритма. В строках табл. 5 приведены данные о количестве решений задачи МКЭ:

- при использовании для вычисления функции ограничений фиксированного шага, обеспечивающего погрешность, не превышающую  $\epsilon_{\min}$  на всем множестве варьируемых параметров;
- при использовании нейросетевого модуля для определения расстояния между узлами временной

сетки на основании информации о текущих параметрах конструкции, параметрах агрессивной среды и допустимой погрешности  $\epsilon_{\min}$ ;

— при использовании нейросетевого модуля в сочетании с методом скользящего допуска.

Таблица 5

Анализ эффективности алгоритма

Алгоритм	Количество обращений к МКЭ
ГА	3 375 508
НС + ГА	1 618 484
МСД + НС + ГА	528 043

Как показывают результаты численного эксперимента, вычислительные затраты для алгоритма, использующего адаптированный метод скользящего допуска, примерно в 3 раза ниже, чем для алгоритма, использующего нейросетевой модуль для получения шага, обеспечивающего допустимую погрешность решения, без уменьшения погрешности в течение поиска решения. Они также примерно в 6 раз ниже, чем вычислительные затраты при использовании генетического алгоритма, в котором для вычисления функции ограничений применяется фиксированный шаг, обеспечивающий погрешность, не превышающую  $\epsilon_{\min}$ . Это подтверждает более высокую эффективность созданного алгоритма по сравнению с существовавшими ранее.

Материалы работы являются развитием исследований по созданию эффективных и точных методов и алгоритмов решения задачи оптимального проектирования конструкций, подверженных влиянию АС, часть из которых нашла отражение в [2, 3]. В дальнейшем предполагается использование алгоритмов на основе МСД для решения задач оптимального проектирования конструкций других классов — балочных систем, плосконапряженных пластин.

## 7. Выводы

В работе сформулирована новая задача оптимального проектирования шарнирно-стержневых конструкций, отличающаяся от известных тем, что:

- при решении задачи учитывались физико-химические процессы, происходящие в конструктивных элементах и вызывающие снижение несущей способности конструкции с течением времени;
- поиск оптимального решения осуществлялся на дискретном неметрическом пространстве варьируемых параметров;
- постановка задачи предполагала получение решения с заданной точностью.

Использование разработанного авторами нейросетевого алгоритма управления погрешностью вычислений функций ограничений позволило изменять параметры численного решения СДУ, моделирующей воздействие агрессивной среды, в процессе решения задачи оптимизации и предложить эффективный алгоритм ее решения на основе метода скользящего допуска.

Полученные при проведении численных экспериментов результаты подтверждают правильность выбранного подхода.

Разработанный алгоритм адаптированного метода скользящего допуска обеспечивает решение задачи оп-

тимизации корродирующих конструкций за меньшее время, чем традиционный генетический алгоритм, и при этом гарантирует заданную точность результата.

### Литература

1. Haug, E. J. Applied optimal design: mechanical and structural systems [Text] / E. J. Haug, J. S. Arora. — John Wiley & Sons, 1979. — 506 p.
2. Зеленцов, Д. Г. Обзор исследований по применению методов нелинейного математического программирования к оптимальному проектированию конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой [Текст] / Д. Г. Зеленцов, Г. В. Филатов // Вопросы химии и химической технологии. — 2002. — № 4. — С. 108–115.
3. Зеленцов, Д. Г. Адаптация метода скользящего допуска к задачам оптимизации корродирующих конструкций [Текст] / Д. Г. Зеленцов, Н. Ю. Науменко // Системні технології. — 2005. — Вип. 2(37). — С. 48–56.
4. Зеленцов, Д. Г. Алгоритм управления точностью численного решения некоторых классов систем дифференциальных уравнений [Текст] / Д. Г. Зеленцов, Л. В. Новикова, Н. Ю. Науменко // Системні технології. — 2012. — Вип. 5(82). — С. 71–79.
5. Зеленцов, Д. Г. Нейронные сети как средство модификации метода скользящего допуска [Текст] / Д. Г. Зеленцов, Л. И. Короткая // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2011. — № 4/4(52). — Р. 21–24. — Режим доступа: \www/URL: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/1384>
6. Coello, C. A. C. Discrete Optimization of Trusses using Genetic Algorithms [Text] / C. A. C. Coello // EXPERSYS-94. The Sixth International Conference on Artificial Intelligence and Expert Systems Applications. — 1994. — Р. 331–336.
7. Wu, S.-J. Steady-state genetic algorithms for discrete optimization of trusses [Text] / S.-J. Wu, P.-T. Chow // Computers & Structures. — 1995. — Vol. 56, № 6. — Р. 979–991. doi:10.1016/0045-7949(94)00551-d
8. Rajeev, S. Discrete Optimization of Structures Using Genetic Algorithms [Text] / S. Rajeev, C. S. Krishnamoorthy // Journal of Structural Engineering. — 1992. — Vol. 118, № 5. — Р. 1233–1250. doi:10.1061/(asce)0733-9445(1992)118:5(1233)
9. Gutkowski, W. Discrete structural optimization [Text] / W. Gutkowski // International Centre for Mechanical Sciences. — Springer, 1997. — Vol. 373. — 250 p. doi:10.1007/978-3-7091-2754-4

10. Himmelblau, D. M. Applied nonlinear programming [Text] / D. M. Himmelblau. — McGraw-Hill, 1972. — 498 p.
11. Callan, R. The Essence of Neural Networks [Text] / R. Callan. — Prentice Hall Europe, 1999. — 232 p.
12. Ashlock, D. Evolutionary Computation for Modeling and Optimization [Text] / D. Ashlock. — New York: Springer, 2006. — 572 p. doi:10.1007/0-387-31909-3

### АЛГОРИТМ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ КОРДУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ МЕТОДУ НЕЖОРСТКОГО ДОПУСКУ

У роботі запропонований новий ефективний алгоритм вирішення задач оптимізації кордуючих шарнірно-стержневих конструкцій, що передбачає отримання результату із заданою точністю. Оптимізаційний алгоритм використовує метод нежорсткого допуску разом з генетичним алгоритмом та нейромережним модулем для керування похибкою обчислення функції обмежень. Пошук рішення здійснювався на дискретному неметричному просторі варійованих параметрів.

**Ключові слова:** корозія, дискретна оптимізація, метод нежорсткого допуску, нейронні мережі, генетичний алгоритм.

*Зеленцов Дмитрій Гегемонівич, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних систем, Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпропетровськ, Україна.*

*Денисюк Ольга Ростиславівна, аспірант, кафедра інформаційних систем, Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: [denolga91@rambler.ru](mailto:denolga91@rambler.ru).*

*Зеленцов Дмитро Гегемонівич, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних систем, Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпропетровськ, Україна.*

*Денисюк Ольга Ростиславівна, аспірант, кафедра інформаційних систем, Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпропетровськ, Україна.*

*Zelentsov Dmitriy, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipropetrovsk, Ukraine.*

*Denysiuk Olga, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: [denolga91@rambler.ru](mailto:denolga91@rambler.ru)*