

<https://doi.org/10.26160/2572-4347-2025-23-15-24>

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА СИНТЕЗА КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА БАЗЕ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭВОЛЮЦИОННЫХ СТРАТЕГИЙ

Матвиенко С.А.

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
Макеевка, Россия*

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, комбинированные технологические процессы, синтез процессов, эволюционные стратегии, генетический алгоритм, дерево решений, технологическая реализуемость.

Аннотация. В статье представлено научно обоснованное описание подхода к разработке комбинированных технологических процессов на базе холодного газодинамического напыления, ориентированного на систематический поиск оптимальных комбинаций методов обработки для достижения заданных эксплуатационных характеристик покрытий. Предложен структурированный алгоритм синтеза комбинированных процессов, основанный на эволюционной стратегии и включающий этапы формирования дерева возможных комбинаций, оценки их технологической реализуемости и прогнозирования свойств покрытий с использованием математического моделирования.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR THE SYNTHESIS OF COMBINED TECHNOLOGICAL PROCESSES BASED ON COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING USING EVOLUTIONARY STRATEGIES

Matvienko S.A.

*Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka,
Russia*

Keywords: cold gas-dynamic spraying, combined technological processes, synthesis, evolutionary strategies, genetic algorithm, decision tree, technological feasibility.

Abstract. The article presents a scientifically substantiated description of an approach to the development of combined technological processes based on cold gas-dynamic spraying, which is focused on the systematic search for optimal combinations of processing methods to achieve the specified performance characteristics of coatings. A structured algorithm for the synthesis of combined processes is proposed, based on an evolutionary strategy and including the stages of forming a tree of possible combinations, evaluating their technological feasibility, and predicting the properties of coatings using mathematical modeling.

Введение. В современном материаловедении и инженерии поверхности деталей все большее значение приобретает синтез материалов и покрытий с функционально-ориентированными свойствами, адаптированными к конкретным условиям эксплуатации. Одним из перспективных подходов к решению этой задачи является использование комбинированных технологических процессов (КТП), сочетающих в себе несколько видов энергетических воздействий для достижения синергетического эффекта и получения свойств, недостижимых при использовании отдельных технологий.

Классификация существующих подходов к синтезу технологических процессов представлена в таблице 1.

Табл. 1. Классификация подходов к синтезу КТП

№	Название	Характеристика
1	Эвристические методы	Основаны на опыте и интуиции технологов. Не гарантируют нахождение оптимального решения и требуют значительных затрат времени и ресурсов
2	Методы, основанные на экспертных системах	Используют формализованные знания экспертов для выбора КТП. Ограничены областью знаний, заложенных в систему, и не способны генерировать новые решения
	Методы, основанные на математическом моделировании	Позволяют прогнозировать свойства материалов и изделий. Требуют разработки сложных моделей и больших вычислительных ресурсов
	Методы, основанные на генетических алгоритмах	Используют принципы эволюции для поиска оптимальных решений. Требуют определения функции пригодности и операторов генетического алгоритма

Традиционные подходы к синтезу технологических процессов, основанные на эвристических методах, опыте технологов или экспертных системах, оказываются неэффективными при решении сложных задач. Они не позволяют гарантировать нахождение оптимального решения и требуют значительных затрат времени и ресурсов. В связи с этим, возникает необходимость в разработке систематических, автоматизированных методов, способных эффективно исследовать пространство возможных решений и синтезировать перспективные КТП для достижения заданных эксплуатационных характеристик покрытий.

Холодное газодинамическое напыление (ХГДН) зарекомендовало себя как эффективный метод формирования покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками [1]. Однако, для расширения области применения ХГДН, часто требуется его интеграция с другими технологиями, такими как предварительная или последующая обработка поверхности, легирование, термическое воздействие и другие [2, 3]. Выбор оптимальной комбинации методов обработки и их параметров представляет собой сложную задачу, поскольку количество возможных вариантов КТП экспоненциально растет с увеличением числа рассматриваемых технологий.

В последние годы все большую популярность в задачах оптимизации сложных технических систем приобретают эволюционные стратегии [4-9]. Эти методы, основанные на принципах естественного отбора, демонстрируют высокую эффективность при поиске оптимальных решений в многопараметрических пространствах с нелинейными зависимостями. В отличие от традиционных методов оптимизации, эволюционные стратегии не требуют знания градиента целевой функции и способны находить глобальные

экстремумы даже в сложных ландшафтах. Их адаптивность и робастность делают их особенно привлекательными для решения задач синтеза КТП, где необходимо учитывать множество взаимосвязанных факторов и ограничений.

В данной статье предлагается новый подход к синтезу КТП на базе ХГДН, основанный на интеграции математического моделирования и эволюционных стратегий. Предлагаемый алгоритм позволяет автоматизировать процесс поиска оптимальных комбинаций методов обработки и их параметров, учитывая технологическую реализуемость КТП и прогнозируемые свойства покрытий. Использование эволюционной стратегии обеспечивает эффективный поиск оптимальных решений в условиях сложного, многопараметрического пространства.

Алгоритм синтеза комбинированных процессов на базе ХГДН. Концептуальное описание алгоритма синтеза КТП на базе ХГДН представлено в таблице 2.

Табл. 2. Концептуальное описание алгоритма синтеза КТП на базе ХГДН

№	Этап	Содержание
1	Формирование дерева возможных комбинаций	Формируется дерево возможных КТП, где корневым узлом является ХГДН, а ветви представляют собой другие методы обработки, которые могут быть применены до, после или одновременно с ХГДН
2	Оценка технологической реализуемости	Оценка технологической реализуемости каждой комбинации, основанная на следующих критериях: совместимость материалов, температурные режимы, экономическая целесообразность. Комбинации, не удовлетворяющие критериям технологической реализуемости, исключаются из дальнейшего рассмотрения.
3	Прогнозирование свойств покрытий с использованием математического моделирования	Для оставшихся комбинаций проводится прогнозирование свойств покрытий с использованием математического моделирования. Используются уравнения состояния, модели износа, модели фазовых превращений и т.д.
4	Оценка эффективности КТП и выбор оптимальной комбинации	На основе результатов моделирования оценивается эффективность каждого КТП, используя заданные критерии (прочность сцепления, износостойкость, коррозионная стойкость и т.д.). Для выбора оптимальной комбинации используется эволюционная стратегия, основанная на следующих принципах: популяция, пригодность, селекция, кроссовер, мутация. Алгоритм повторяется до достижения сходимости или выполнения заданного числа итераций.

Математическое моделирование свойств покрытий. Для прогнозирования свойств покрытий использовались эмпирические модели, основанные на анализе размерностей и регрессионном анализе экспериментальных данных.

Для оценки износостойкости использовалась следующая модель:

$$I = C_1(HV)a_1(Ra)a_2(\sigma)a_3 \exp(-E_a/(RT)), \quad (1)$$

где I – интенсивность изнашивания, $\text{м}^3/\text{м}$; HV – микротвердость покрытия, Па; Ra – шероховатость поверхности, м; σ – контактное давление, Па; E_a – энергия активации процесса изнашивания, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль К); T – температура, К; C_1, a_1, a_2, a_3 – эмпирические коэффициенты, определяемые на основе экспериментальных данных.

Для оценки прочности сцепления использовалась модель, основанная на энергетическом подходе:

$$\tau = C_2(\gamma_s + \gamma_p - \gamma_{sp})/d, \quad (2)$$

где τ – прочность сцепления, Па; γ_s – поверхностная энергия подложки, Дж/м²; γ_p – поверхностная энергия покрытия, Дж/м²; γ_{sp} – энергия межфазной границы, Дж/м²; d – средний размер зерен в покрытии, м; C_2 – эмпирический коэффициент.

Описание эволюционной стратегии. Для поиска оптимальной комбинации параметров КТП использовалась эволюционная стратегия (ЭС) с самоадаптацией параметров мутации [8]. Каждая особь в популяции представляет собой вектор параметров КТП (например, давление газа при ХГДН). В качестве функции пригодности использовалась линейная комбинация целевых характеристик покрытия (твердость, износостойкость, коррозионная стойкость) с весовыми коэффициентами, определяемыми экспертом. Использовались следующие операторы: турнирная селекция с размером турнира 2, дискретный кроссовер, гауссовская мутация. Для каждой особи генерируется вектор случайных чисел:

$$x_i' = x_i + \sigma_i N(0,1). \quad (3)$$

Для каждого параметра особи хранится индивидуальная стратегия параметр – σ_i (стандартное отклонение гауссовской мутации). Используются следующие правила адаптации:

$$\sigma_i = \sigma_i \exp(t_{ao} N(0,1) + t_{ao}' Ni(0,1)), \quad (4)$$

где $t_{ao} = (2n)^{(-0,5)}$, $t_{ao}' = (2n)^{0,5}$ – параметры скорости обучения (n – число параметров решения, $Ni(0,1)$ – i -й элемент вектора $N(0,1)$).

Использование самоадаптации позволяет алгоритму динамически подстраивать интенсивность мутации в зависимости от ландшафта функции пригодности.

Оценка вычислительной сложности. Вычислительная сложность разработанного алгоритма определяется следующими факторами:

1) Формирование дерева КТП. Сложность зависит от количества рассматриваемых методов обработки и глубины дерева и составляет $O(b^d)$, где b – среднее количество ветвей в каждом узле, d – глубина дерева.

2) Оценка технологической реализуемости. Сложность зависит от количества критериев технологической реализуемости и количества комбинаций, прошедших этап формирования дерева и составляет $O(nm)$, где n – количество комбинаций, m – количество критериев.

3) Прогнозирование свойств покрытий. Сложность зависит от сложности математических моделей и количества комбинаций, прошедших этап оценки технологической реализуемости и составляет $O(n)$, где n – количество комбинаций.

4) Эволюционная стратегия. Сложность зависит от размера популяции, количества поколений и сложности функции пригодности и составляет $O(NGf)$, где N – размер популяции, G – количество поколений, f – сложность вычисления функции пригодности.

Таким образом, общая вычислительная сложность алгоритма может быть оценена как:

$$O(b^d + nm + n + NGf). \quad (5)$$

Интегрированный алгоритм синтеза КТП на базе ХГДН. Интегрированный алгоритм синтеза КТП на базе ХГДН направлен на систематический поиск и оптимизацию КТП для достижения заданных эксплуатационных характеристик покрытий. Он объединяет этапы инициализации, динамического моделирования, оценки технологической реализуемости, прогнозирования свойств, применения машинного обучения (опционально), мультикритериальной оптимизации и принятия решений, используя обратную связь между блоками для повышения эффективности.

Блок-схема алгоритма (рис. 1) имеет итеративную структуру с обратными связями, отражающую взаимосвязь между этапами и необходимость динамической корректировки решений.

Основные блоки алгоритма: 1) начало (инициализация); 2) динамическое моделирование (основной цикл 1); 3) оценка свойств и реализуемости (внутри основного цикла 1); 4) принятие решений (внутри основного цикла 1); 5) машинное обучение (опционально) (основной цикл 2); 6) мультикритериальная оптимизация (основной цикл 2); 7) конец.

Пример реализации алгоритма синтеза КТП для повышения износостойкости покрытий, наносимых методом ХГДН, представлен в таблице 3.

Численная реализация и результаты. Основные модули программного обеспечения представлены в таблице 4.

Разработанный алгоритм синтеза КТП на базе ХГДН был реализован с использованием языка программирования Python 3.9 и специализированных библиотек для численного моделирования, оптимизации и анализа данных. В частности, для реализации алгоритма использовались следующие компоненты: Python 3.9 для разработки логики и управления процессом, SciPy и NumPy для выполнения численных расчетов и математических операций, Matplotlib и Seaborn для визуализации результатов моделирования, а также NetworkX для создания и анализа графовых структур, представляющих дерево

возможных комбинаций КТП. В качестве базы данных для хранения и управления информацией о свойствах компонентов и результатах расчетов использовалась SQLite. Для более детального моделирования физико-химических процессов в рамках ХГДН возможно опциональное использование COMSOL Multiphysics.

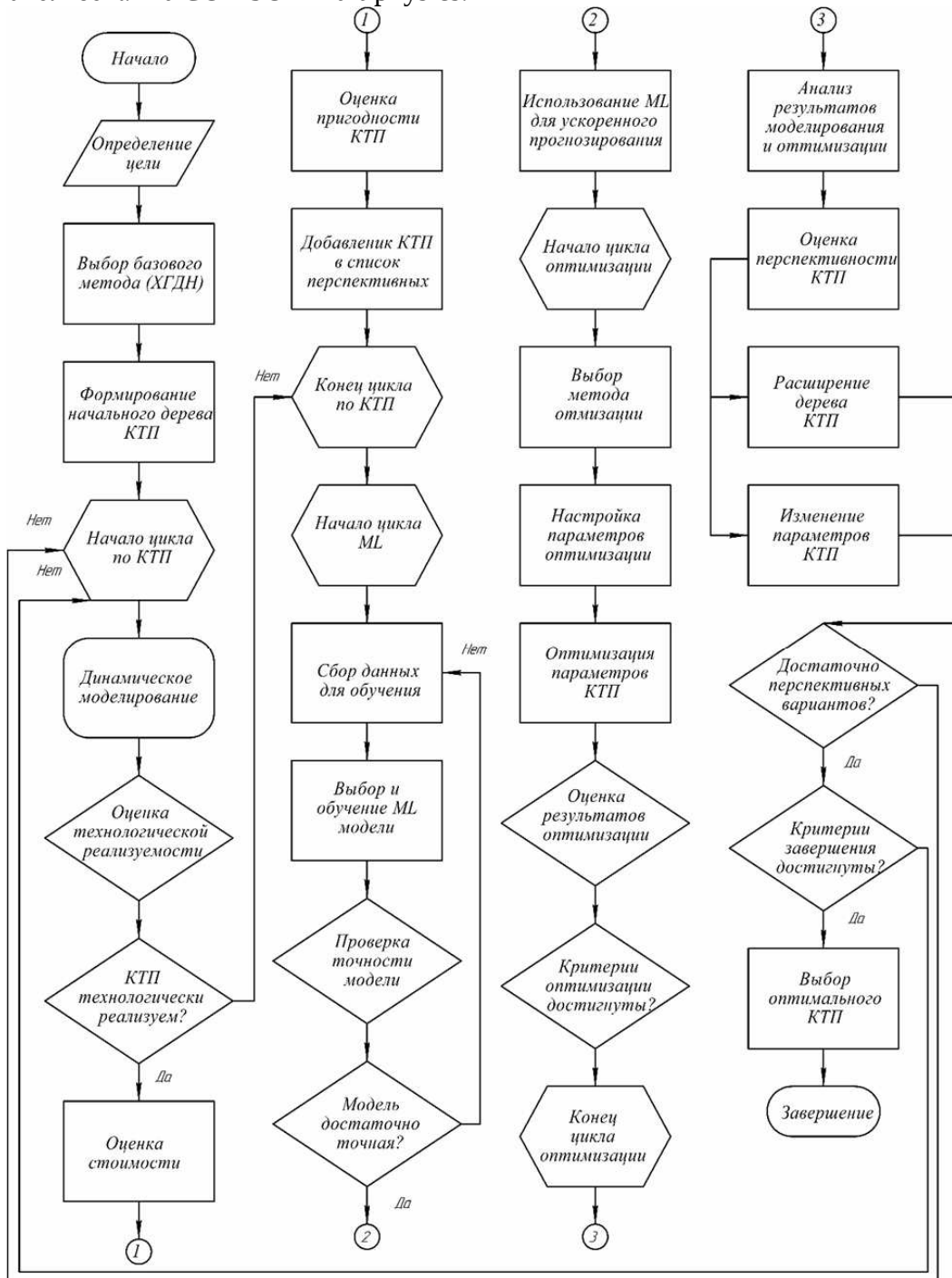


Рис. 1. Блок-схема интегрированного алгоритма синтеза КТП на базе ХГДН

Табл. 3. Пример реализации алгоритма синтеза КТП

№	Этап	Содержание
1	Формирование дерева возможных комбинаций	Помимо ХГДН рассматриваются следующие методы: предварительная обработка (дробеструйная обработка), последующая обработка (МИО, термическая обработка)
2	Оценка технологической реализуемости	Исключаются комбинации, приводящие к нежелательным фазовым превращениям.
3	Прогнозирование свойств покрытий с использованием математического моделирования:	Используются модели износа, учитывающие влияние остаточных напряжений, размера зерен и других параметров микроструктуры.
4	Оценка эффективности КТП и выбор оптимальной комбинации:	Эволюционная стратегия позволяет найти оптимальное сочетание предварительной обработки, ХГДН и последующей обработки, обеспечивающее максимальную износостойкость.

Табл. 4. Модули программного обеспечения

№	Модуль	Назначение
1	Генератор дерева КТП	Модуль, реализующий алгоритм формирования дерева возможных комбинаций методов обработки. Реализована возможность выбора типа графа: ориентированный или неориентированный
2	Оценщик технологической реализуемости	Модуль, реализующий алгоритм оценки технологической реализуемости каждой комбинации. Использовалась база данных, включающая около 40 различных материалов (подложки и порошки) и 14 методов обработки
3	Прогнозирование свойств покрытия:	Реализуются математические модели для прогнозирования свойств покрытия в зависимости от параметров КТП. Модели реализованы на основе МКЭ и учитывают влияние следующих факторов: остаточные напряжения, размер зерен, фазовый состав, плотность дислокаций
4	Оптимизатор КТП	Модуль, реализующий эволюционную стратегию для поиска оптимальных параметров КТП. Использовались следующие параметры эволюционной стратегии: размер популяции 50; число поколений 100; вероятность мутации 0,1; вероятность кроссовера 0,7. Целевая функция реализована как линейная комбинация нескольких критериев (твёрдость, износостойкость, коррозионная стойкость)
5	Визуализатор результатов	Модуль, обеспечивающий графическое представление результатов оптимизации и построение графиков зависимостей свойств покрытия от параметров КТП. Реализована возможность построения графиков в 2D и 3D.

Пример результатов работы алгоритма представлены в таблице 5.

Табл. 5. Пример результатов работы алгоритма

№		
1	Формирование дерева КТП	Сгенерировано 8 возможных КТП на основе операций: ДСО, ХГДН (с УЗ-колебаниями подложки). Рассмотрены варианты с различной последовательностью и повторением операций, а также с исключением операции ДСО или УЗК).
2	Оценка технологической реализуемости	Отобрано 4 КТП, удовлетворяющих критериям: совместимости СЧ20 (подложка) и смеси Ni-Al (покрытие), температурным режимам ($T < 350^{\circ}\text{C}$ для предотвращения образования интерметаллидов), обеспечение адгезии покрытия к подложке и достижение необходимой плотности покрытия.
3	Оптимизация параметров	Эволюционная стратегия определила оптимальный КТП: ДСО $\rightarrow$ ХГДН (с УЗ-колебаниями). Параметры: ДСО: интенсивность 0,2 мм, время 90 с, дробь – чугунная (ГОСТ 801-78); ХГДН: давление 2,8 МПа, температура 280°C , расход порошка (Ni-Al) – 25 г/мин, соотношение Ni:Al = 70:30 (по массе), частота УЗ-колебаний – 22 кГц, амплитуда УЗ-колебаний – 8 мкм.

Обсуждение результатов. Разработанный алгоритм синтеза КТП на базе ХГДН продемонстрировал свою работоспособность и эффективность.

Преимущества предлагаемого алгоритма: системный подход, учет технологической реализуемости, использование математического моделирования, применение эволюционных стратегий, автоматизация, гибкость. По сравнению с эвристическими методами и методами, основанными на экспертных системах, предлагаемый алгоритм обеспечивает более систематический и объективный подход к синтезу КТП. В отличие от методов, основанных только на математическом моделировании, использование эволюционных стратегий позволяет находить оптимальные решения в условиях сложного, многопараметрического пространства.

Предлагаемый подход сочетает преимущества существующих методов, позволяя автоматизировать поиск оптимальных КТП и снизить затраты на экспериментальные исследования.

Выводы. В статье предложен новый подход к синтезу комбинированных технологических процессов на базе ХГДН, основанный на эволюционной стратегии и учитывающий технологическую реализуемость и свойства покрытий. Алгоритм позволяет систематически исследовать пространство возможных решений и находить наиболее перспективные КТП для достижения заданных эксплуатационных характеристик покрытий. Дальнейшие исследования будут направлены на: разработку более точных моделей, описывающих влияние различных факторов на свойства покрытий; создание программного обеспечения, автоматизирующего процесс синтеза КТП; экспериментальную проверку результатов моделирования и оптимизации.

Список литературы

1. Матвиенко С.А., Бачурин Н.Д. Концепция формирования функциональных покрытий методом холодного газодинамического напыления // Машиностроение и техносфера XXI века: Труды XXXI Международной научно-технической конференции. – Донецк: ДОННТУ, 2024. – С. 209-213.
2. Матвиенко С.А., Гончаров А.М. Повышение кавитационной стойкости гильз цилиндров форсированных дизелей // Студенческий научно-технический журнал. – 2024. – №1. – С. 56-59.
3. Матвиенко С.А., Стрельник Ю.Н., Савенко Э.С. Аналитическая модель процесса образования покрытия методом холодного газодинамического напыления // Современные проблемы теории машин. – 2025. – №19. – С. 135-139. – doi.org/10.26160/2307-342X-2024-19-135-139.
4. Балабанов В.И., Куйчиев О.Р. Алгоритмы оптимизации механических систем с применением методов искусственного интеллекта для повышения эффективности и надежности // Экономика и социум. – 2024. – №10-1(125). – С. 528-531.
5. Захаров Н.С., Козин Е.С. Технологическое проектирование станций технического обслуживания автомобилей с использованием генетических алгоритмов // Транспорт и информационные технологии. – 2024. – Т. 14, №2. – С. 104-122. – DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-2-296.
6. Buchsh Z.A., Stipanovich I., Dori A.G. A System for Long-Term Maintenance Planning Using Multi-Attribute Utility Theory and Genetic Algorithms // Review of European Transport Research. 2020, no. 12, p. 3. doi.org/10.1186/s12544-019-0388-y.
7. Козов А.В. Сравнение эффективности некоторых модификаций алгоритма эволюционной стратегии // Политехнический молодежный журнал. – 2018. – №5(22). – С. 1-14.
8. Дивеев А.И. Эволюционные вычисления для решения задачи терминального оптимального управления // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2023. – №1(142) – С. 44-59. – doi.org/10.18698/0236-3933-2023-1-44-59.
9. Шалин В.Б., Тропин А.Н. Использование эволюционных стратегий и генетических алгоритмов в решении задач синтеза оптических покрытий // Труды II Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. – М.: МИФИ, 2013. – С. 54-55.

References

1. Matvienko S.A., Bachurin N.D. The concept of formation of functional coatings by the method of cold gas-dynamic spraying // Mechanical engineering and technosphere of the XXI century: Proceedings of the XXXI International scientific and technical conference. – Donetsk: DONNTU, 2024. – P. 209-213.
2. Matvienko S.A., Goncharov A.M. Increase of the cavitation resistance of cylinder liners of forced diesel engines // Student Scientific and Technical Journal. 2024, no. 1, pp. 56-59.
3. Matvienko S.A., Strel'nik Yu.N., and Savenko E.S. Analytical Model of the Process of Coat Formation by Cold Gas-Dynamic Spraying // Modern Problems of Machine Theory. 2025, no. 19, pp. 135-139. doi.org/10.26160/2307-342X-2024-19-135-139.
4. Balabanov V.I., Kuichiev O.R. Algorithms for Optimizing Mechanical Systems Using Artificial Intelligence Methods to Improve Efficiency and Reliability // Economics and Sociology. 2024, no. 10-1(125), pp. 528-531.

5. Zakharov N.S., Kozin E.S. Technological Design of Car Maintenance Stations Using Genetic Algorithms // Transportation and Information Technologies in Russia. 2024, vol. 14, no. 2, pp. 104-122. doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-2-296.
6. Buchsh Z.A., Stipanovich I., Dori A.G. A System for Long-Term Maintenance Planning Using Multi-Attribute Utility Theory and Genetic Algorithms // Review of European Transport Research. 2020, no. 12, p. 3. doi.org/10.1186/s12544-019-0388-y.
7. Kozov A.V. Comparison of the effectiveness of some modifications of the evolutionary strategy algorithm // Polytechnic Youth Journal. 2018, no. 5(22), pp. 1-14.
8. Diveev A.I. Evolutionary computing for solving the terminal optimal control problem // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. 2023, no. 1(142), pp. 44-59. doi.org/10.18698/0236-3933-2023-1-44-59.
9. Shalin V.B., Tropin A.N. Using evolutionary strategies and genetic algorithms in solving problems of optical coating synthesis // Proceedings of the II All-Russian Conference on Photonics and Information Optics. – Moscow: MEPHI, 2013. – P. 54-55.

Матвиенко Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации serge-matvienko@yandex.ru	Matvienko Sergey Anatolyevich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of motor transport, service and operation
---	---

Received 25.08.2025